



EESTI MAAÜLIKOOL

Tehnikainstituut

Eduard Herm

**ÕPPEVAHEND KOORDINAAT-MÕÕTEMASINA (CMM)
KASUTAMISEKS**

**LEARNING MATERIALS FOR THE COORDINATE
MEASURING MACHINE**

Magistritöö
Tootmistehnika õppekava

Juhendaja: Tõnu Leemet, *PhD*

Tartu 2021

Eesti Maaülikool		Magistritöö lühikokkuvõte	
Kreutzwaldi 1, Tartu 51014			
Autor: Eduard Herm		Õppekava: Tootmistehnika	
Pealkiri: Õppevahend koordinaat-mõõtemasina (CMM) kasutamiseks			
Lehekülgi: 86	Jooniseid: 63	Tabeleid: 3	Lisasid: 2
Osakond / Õppetool: Tehnikainstituut, Biomajandustehnoloogiate õppetool			
ETIS-e teadusvaldkond ja CERC S-i kood: ETIS: 4. Loodusteadused ja tehnika, 4.14. Tootmistehnika			
CERCS teaduseriala: T130 Tootmistehnoloogia			
Juhendaja(d): Tõnu Leemet, PhD			
Kaitsmiskoht ja -aasta: Tartu, 2021			
<p>Seoses tootmise kiire arenguga pööratakse erilist tähelepanu valmistatud detailide kvaliteedile ja täpsusele. Toodetud detailide kvaliteedi tõstmiseks on hakatud kontrollimisprotsessis aina rohkem kasutama koordinaat-mõõtemasinaid. Koordinaat-mõõtemasinate mõõdete tulemused võimaldavad põhjalikult analüüsida mõõdetavat objekti ja teha järeldusi võimalike tootmisviiside kohta.</p> <p>Magistritöö peamiseks eesmärgiks oli koostada õppevahend koordinaat-mõõtemasina kasutamiseks. Siht oli ehitada õpe üles nii, et see oleks maksimaalselt arusaadav, loogiline ja sobiva mahuga. Koostatud õppevahend on tehtud Eesti Maaülikooli õppeainele TE.0939 „Tööstusliku metroloogia praktikum“ läbiviimiseks.</p> <p>Esitatud ülesande jaoks sai valitud manuaalne koordinaat-mõõtemasin Axiom Too, mis asub Eesti Maaülikooli tehnikainsituudi mõõtelaboris. Õppevahendi jaoks valiti järgmised mõõteotsikud: keraamiline kettakujuline mõõteotsik, kettakujuline rullikuga mõõteotsik ning viiest mõõteotsikutest koosnev <i>star-kujuline</i> mõõteotsik. Magistritöö raames katsetati, kirjeldati ja analüüsiti mõõteotsikute mõõtmisvõimalusi. Õppevahend koosneb teoreetilisest ja praktilisest osast.</p> <p>Praktiline osa koosneb kirjalikest juhenditest ning õppevideotest. Kirjalikus juhendis on põhjalikult seletatud, mida tuleb teha enne mõõtmise alustamist. Selle järel esitatakse</p>			

kontseptsioon/ülevaade mõõteotsiku kvalifitseerimistest. Üksikasjalikult instrueeritakse mõõteotsikute kvalifitseerimise põhimõtteid ning antakse korrektselt järjestatud juhised mõõdetava objekti võimalike koordinaatsüsteemide konstrueerimiseks.

Praktilise osa kirjutamise käigus töötati välja vorm uue õppematerjali loomiseks. Selleks filmiti ja monteeriti 7 õppevideot. Videojuhendite kogupikkus on 26 minutit ja 37 sekundit. Iga õppevideo sisaldab tehtud toimingute kommentaare koos selgitustega. Õppevideotes kuvatakse mõõtmisprotsessi Aberlinki 3D-tarkvaraga ning detailide mõõtmisprotsessi Axiom Too koordinaat-mõõtemasina abil.

Magistritöö kirjutamise käigus sai selgeks, et teoreetiline osa on baasteadmisteks kõigest silla-tüüpi (*bridge type*) koordinaat-mõõtemasinatest Cartesiuse koordinaatsüsteemiga. Teoreetilises osas on esitatud informatsioon koordinaat-mõõtemasina tööpõhimõtetest ja mõõtmisviisist.

Märksõnad: mõõtemasin, CMM, koordinaat-mõõtemasin, Axiom Too

Estonian University of Life Sciences Kreutzwaldi 1, Tartu 51014		Abstract of Master's Thesis	
Author: Eduard Herm		Curriculum: Production Engineering	
Title: Learning materials for the coordinate measuring machine			
Pages: 86	Figures: 63	Tables: 3	Appendixes: 2
Department / Chair: Institute of Technology, Chair of Biosystems Engineering Field of research and (CERC S) code: ETIS: 4. Natural Sciences and Engineering, 4.14. Industrial Engineering and Management CERCS: T130 Production Technology Supervisors: Tõnu Leemet, PhD Place and date: Tartu, 2021			
Herm, E. Learning materials for the coordinate measuring machine. – Master's thesis. 1 copies; Tartu, 2021. 63 figures, 3 tables, format A4, 7 learning videos and 1 training manual in attachments. In Estonian.			
As the production develops quickly, focusing on the quality and accuracy of manufactured products. To improve the production accuracy, coordinate measuring machines have become more often introduced into the quality control process. The results of the coordinate measuring machines allow for a detailed analysis of the measured object and draw conclusions regarding the potential production possibilities.			
The aim of this Master's thesis was to create a learning material for the coordinate measuring machine. The main task was to build training so that it is as clear as possible, logical and the right amount of information. The learning materials will be used to study at the lectures and practical lessons „TE.0939 Industrial metrology exercises “.			
For the task, the coordinate measuring machine Axiom Too with manual control, which is located in the measuring laboratory of the Estonian University of Life Sciences, was chosen. For the training manual, chosen the most difficult measurement styluses: a ceramic disc stylus, a disc stylus with roller and stylus by Star type. Styluses measurement capabilities are analyzed. The training manual consists of the theoretical and practical part.			

The practical part was created from the training manual. The training manual describes the preliminary preparation of the measuring system before measurement. The correct concept of the stylus qualification is given. The qualification process of difficult measurement styluses is instructed in detail. In training manual and learning videos are given for creating six degrees of freedom for measured object.

The best way to master the learning materials has been found. For this, 7 training videos were recorded. The total duration of training videos is 26 minutes and 37 seconds. In each training video are comments on the preformed action with explanations. In the training videos show the basic functions in the Aberlink 3D software for the Axiom Too coordinate measuring machine and shown how to measure the part correctly.

In the process of writing master's thesis, it became clear that the theoretical part is basic knowledge about bridge coordinate measuring machines with Decart coordinate system. The theoretical part presents information about the coordinate measuring machines of basic knowledge, the working principle of measuring machines and about the measuring strategy.

Keywords: CMM, coordinate measuring machine, Decart, coordinate system, six degrees of freedom, alignment, rotate, stylus, probe, probe head.

SISUKORD

SISSEJUHATUS	8
1. MÕÕTMINE	10
1.1. Koordinaatsüsteemiga mõõtemasinad	10
1.2. Mõõtemasina koordinaatsüsteemid.....	13
1.3. Koordinaat-mõõtemasinate mõõtetäpsus	16
1.3.1. Koordinaat-mõõtemasina kalibreerimine	18
2. KOORDINAAT-MÕÕTEMASINA ELEMENDID	23
2.1. Mõõtemasina põhielemendid	23
2.2. CMM-i telgede liikumised.....	24
2.3. Telgede liikumise ajamid.....	25
2.4. Liikumise joonandurid	26
2.5. Mõõtepead	28
2.5.1. Puutetundlikud mõõtepead	29
2.5.2. Renishaw TP20 mõõtepea	32
2.5.3. Pöördeline mõõtepea	34
2.6. Mõõtepea vahetusrakis	35
2.7. Mõõteotsikud	36
2.7.1. Mõõteotsikute valik	41
2.8. Mõõteotsiku kvalifitseerimine	42
3. MÕÕTEMASIN AXIOM TOO	46
3.1. Mõõtmisstrateegia.....	46
3.2. Detaili positsioneerimine	47
3.2.1. Mõõtetasapinnad.....	47
3.3. X-, Y- ja Z-telje joondamine.....	48
3.3.1. Tarkvara mõõtmisakna nupud	51
3.4. Geomeetria komponendid.....	52

3.4.1.	Tasapind	52
3.4.2.	Joon.....	54
3.4.3.	Ringjoon	56
3.4.4.	Punkt.....	58
3.4.5.	Sfäär.....	59
3.4.6.	Silinder	60
3.4.7.	Koonus.....	61
4.	ASENDITOLERANTSIDE MÕÕTMINE.....	63
4.1.	Koht	64
5.	MÕÕTMISE TULEMUSED.....	66
5.1.	Tulemused ekraanil.....	66
5.2.	Raporti koostamine	66
6.	ÕPPEVAHENDI LOOMINE.....	68
6.1.	Teoreetiline osa.....	68
6.2.	Praktiline osa.....	69
6.3.	Videomaterjalid	70
KOKKUVÕTE		71
KASUTATUD KIRJANDUS		73
LISAD		77
Lisa A. Axiom Too. Mõõteotsiku kvalifitseerimine, koordinaatsüsteemi loomine		78

SISSEJUHATUS

Seoses tootmise arenguga ja toodetavate detailide kvaliteedinõuete kasvamisega on suurenenud koordinaat-mõõtemasinate kasutamise vajadus. Koordinaat-mõõtemasin võimaldab operatiivselt reageerida ning tootmisprotsessis kontrolli teostada. Koordinaat-mõõtemasinaga saab teha analüüsi ja järeldusi võimalike tootmisviiside kohta ning tagada kvaliteedikontrolli jooniste nõude järgi [1].

Koordinaat-mõõtemasinate eeliseks on võimalus ühe mõõtemasinaga teha mõõtmete kontrolli erineva kujuga detailidele täpsusega kuni $\pm 3 \mu\text{m}$ sõltubmõõdetavate punktide vahelisest kaugust Arvutijuhtimise programmeerimisfunktsiooniga koordinaat-mõõtemasinaid võivad vähendada tootmiskulusid ning minimeerida inimfaktori mõju [1].

Käesoleva magistritöö eesmärk on koordinaat-mõõtemasina õppevahendi loomine. Eesmärgi saavutamiseks määrati järgmised ülesanded:

1. Allikate järgi koostada ülevaade koordinaat-mõõtemasinatest ja nende täpsusest.
2. Kirjeldada koordinaat-mõõtemasina kalibreerimisprotsessi, pöörates erilist tähelepanu uuritavale koordinaat-mõõtemasinale Axiom Too.
3. Kirjeldada koordinaat-mõõtemasinas Axiom Too kasutatava mõõtesondi TP20 tööd.
4. Selgitada, kuidas õigesti mõõteotsikut valida, ning kirjeldada mõõteotsikute kvalifitseerimisprotsessi kalibreerimissfääri abil.
5. Analüüsida Eesti Maaülikooli mõõtelabori koordinaat-mõõtemasina Axiom Too mõõtmisvõimalusi.
6. Anda põhjalik selgitus mõõdetava objekti koordinaatsüsteemi konstrueerimisest.
7. Luua kirjalik õppejuhend kõige keerukamate mõõteotsikute jaoks.
8. Üksikasjalikult kirjeldada kettakujuliste mõõteotsikute kvalifitseerimisprotsessi.
9. Esitada näidis mõõdetava objekti koordinaatsüsteemi konstrueerimisest kettakujulise mõõteotsiku abil.
10. Luua õppevideo kirjaliku õppejuhendi jaoks.

Kõik püstitatud ülesanded said täidetud ja nende põhjal loodi õppevahend koordinaat-mõõtemasina kasutamiseks, mille teoreetiline osa sobib kõigi silla-tüüpi (*bridge type*) koordinaat-mõõtemasinate baasteadmiste õpetamiseks.

Käesoleva magistritöö esimeses põhijaotises käsitletakse mõõtemasinate tüüpe. Antakse ülevaade koordinaat-mõõtemasinatest ning mõõtemasinate koordinaatsüsteemidest. Kirjeldatakse koordinaat-mõõtemasinate mõõtevea tekkimise põhjuseid. Käsitletakse koordinaat-mõõtemasinate kalibreerimismeetodeid. Näitena on toodud standard ISO 10360 ja Ameerika Ühendriikide standard ASME B89.4.1b-2001, kuna koordinaat-mõõtemasin Axiom Too kalibreeritakse selle standardi järgi.

Teises põhijaotises kirjeldatakse koordinaat-mõõtemasina põhielemente. Käsitletakse erinevaid mõõtesüsteeme ning puutetundlikke mõõtepead TP20, mida kasutatakse koordinaat-mõõtemasinas Axiom Too. Erilist tähelepanu pööratakse mõõteotsikute kirjeldusele ja nende õigele valikule. Selgitakse mõõteotsiku kvalifitseerimisprotsessi kalibreerimissfääri abil.

Kolmas põhijaotis koosneb õppejuhendist geomeetriliste elementide mõõtmiseks ning geomeetriliste elementide konstrueerimiseks koordinaat-mõõtemasina Axiom Too abil. Antakse soovitusi mõõtmisstrateegia ning mõõdetava objekti koordinaatsüsteemi konstrueerimise kohta. Selgitatakse Aberlinki 3D-tarkvara kõige keerukamaid funktsioone.

Neljandas põhijaotises on esitatud geomeetriliste tolerantside konstrueerimisvõimalused. Geomeetrilised tolerantsid ilmuvad mõõtmise põhiekraanile kohe peale mõõtmist, juhul kui mõõtepunktide minimaalsest arvust oli mõõdetud kas või üks punkt rohkem. Põhjalikult käsitletakse seda, kuidas leida positsiooni hälvet, ja antakse informatsiooni tulemustega mõõtmisraporti koostamise kohta.

Viiendas põhijaotises selgitakse mõõtetulemuste ekraanile kuvamise ning mõõteraporti arvutisse salvestamise võimalusi.

Kuuendas põhijaotises kirjeldatakse õppevahendi ning õppevideote loomise protsessi.

Lisades on esitatud kirjalik õppevahend; videomaterjalid on esitatud eraldi andmekandjal. Õppevideo materjalid on loodud õppevahendiga samas ajalises järjekorras.

1. MÕÕTMINE

Masinaehituses ja tootmises tuleb rohkem toodetud detaile mõõta koordinaatmeetodi abil. Meditsiinilises tootmises kasutatavate keeruliste ja väga täpsete mõõtudega detailide kontrolli teostatakse koordinaatmeetodi abil, kasutades koordinaat-mõõtemasinaid. Koordinaat-mõõtemasinaks nimetatakse universaalset mõõteseadet, mis on ökonoomiliselt kasulik ja lihtne hooldada. Koordinaat-mõõtemasin on mõõteseadet nii seeriatootmises kui ka masstootmises. Mõõtemasinaid on efektiivsed tootmise kõigis etappides – neid kasutatakse laboris, kvaliteedikontrollis ning isegi haridusasutustes [1, 4].

1.1. Koordinaatsüsteemiga mõõtemasinaid

Kõikide mõõtemasinate aluseks peetakse mõõtemikroskoopi. Mikroskoobil on mõõtelaud, millele asetatakse mõõteobjekt, kaks koordinaattelget X ja Y ning anduriks mikroskoop või inimese silm. Mikroskoobi operaator fikseerib koordinaadid, mis on märgitud mõõtelaua skaaladele. Kaasaegsete mõõtemikroskoopide kasutamine on lihtsustanud koordinaatide fikseerimist. Nüüd loetakse ja esitatakse koordinaate displei-ekraanile kontrolleri abil. Selle mõõtemeetodi üheks põhiliseks puuduseks on operaatori otsene mõju mõõtetulemusele mõõteobjekti visuaalse koordineerimise teel. Lisaks on selline mõõtmine kallis, keeruline ja ajakulukas [2, 3].

Koordinaat-mõõtemasinate täiendamise ja automatiseerimise loogiliseks edasiminekuks sai täisjõuliste mõõtemasinate loomine. Uute mõõtemasinate tähtsamateks kriteeriumideks on täpsus ja kiirus. Tänapäeval on olemas mitut tüüpi koordinaat-mõõtemasinaid [6, 15]:

1. **Portatiivne manuaalsed koordinaat-mõõtemasinaid** on mobiilsed, neid saab kasutada igas tootmisloigus. Nendega töötamine ei nõua spetsiaalset ettevalmistust, sest mõõtemasin ei vaja keerulist seadistamist ja kalibreerimist. Mõõtemasin paigaldatakse statiivile ja seda saab kasutada igas ruumis. Sellistel mõõtemasinateel on kaks mõõtmisvõimalust: kontaktne viis, mille puhul kontakt luuakse mõõteotsiku abil; ning kontaktivaba viis, mille puhul detaili mõõtmiseks kasutatakse laserskannerit. Tänapäevased portatiivne manuaalsed mõõtemasinaid on varustatud keerulise vastukaalude süsteemiga, mis parandab täpsust ja vähendab mõõtemasina juhtimisest tingitud väsimust. Tarkvara võimaldab luua mõõtmisobjekti 3D-mudeli [6,15].



Joonis 1.1. Hexagon Arm7 portatiivne manuaalne mõõtemasin [15]

2. **Horisontaalkangmõõtemasina**d on mõeldud suuregabariidiliste objektide mõõtmiseks. Tavaliselt kasutatakse neid autotööstuses automatiseeritud tootmises. Olemas on ühe- ja kahekangilised mõõtemasina. Kahekangilistes mudelites on sünkroonne koordinaatsüsteem, mis võimaldab üheaegselt teostada mõõtmist kahe mõõtekangiga (mõõtepealga). Selle mõõtemasina konstruktsiooni eripäraks on fotoelektrilised barjäärid ning laser- ja videoandurid. Need on vajalikud kokkupõrke kontrolli kiiretoimelise funktsiooni töötamiseks, et vältida kokkupõrget nii detaili kui ka operaatoriga [6,16].



Joonis 1.2. Mitutoyo CARBstrato kahekangiline koordinaat-mõõtemasin [16]

3. **Silla-tüüpi (bridge type) koordinaat-mõõtemasina**d. See mõõtemasinate tüüp on välja töötatud kõige täpsemate ja keerukamate mõõdete jaoks. Kokku on olemas kahte silla-tüüpi koordinaat-mõõtemasinaid. Esimene on mõõtemasin, kus töölaud on

staatiline ja tööplatvorm liigutatav, teine on mõõtemasin, kus töölaud on liigutatav ja tööplatvorm staatiline. Teist tüüpi mõõtemasinaid kasutatakse tunduvalt harvemini kui esimest tüüpi mõõtemasinaid. Sellistel mõõtemasinateel on jäik konstruktsioon koos vibroisolatsiooni süsteemiga. Mõõteotsikute suur valik, mõõtepeade automatiseeritud vahetus ja mõõtekiiruste lai diapsoon annavad võimaluse teha kiireid ja täpseid mõõtmisi [6, 13].



Joonis 1.3. Aberlink Axiom Too HS CMM silla-tüüpi koordinaat-mõõtemasin [13]

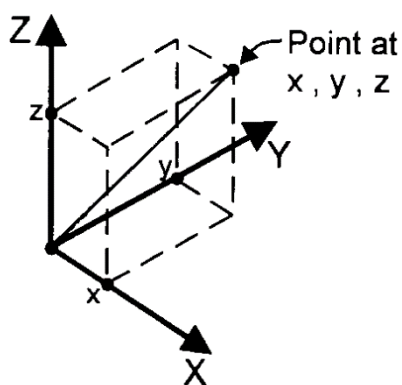
4. **Portaal-tüüpi koordinaat-mõõtemasinaid.** Sellist tüüpi masinaid kasutatakse suuregabariidiliste objektide, näiteks lennuki- ja kosmosetehnika detailide mõõtmiseks. Vaatamata suurendatud käigupikkusele on sellised mõõtemasinaid väga täpsed. Nii nagu silla-tüüpi koordinaat-mõõtemasinateel, on ka portaal-tüüpi koordinaat-mõõtemasinatele saadaval mõõteotsiku ja detaili ahelkontakti abil skaneerimise funktsioon. Mõõtemasina konstruktsioonis on kasutatud spetsiaalseid mõõtepeasid, mille mõõteotsikud on kaaluga kuni 1000 g ja mõõteotsikute pikkus pole rohkem kui 800 mm. Selliste mõõtemasinate peamiseks eeliseks on sisse ehitatud mõõtemasina vibratsioonide kustutamise pneumosüsteem [6, 15].



Joonis 1.4. Hexagon, Leitz PMM-G portaal-tüüpi koordinaat-mõõtemasin [15]

1.2. Mõõtemasina koordinaatsüsteemid

Mõõtemasinaks nimetatakse seadet, mis mõõdab objektide geomeetriat mõõdetava objekti pinnal olevate diskreetsete punktide mõõtmise teel. Lähtudes koordinaat-mõõtemasinate tüüpidest ja teades baaselementide konstruktsiooni, nende korrelatsiooni ja asukohta ruumis, saab koordinaat-mõõtemasinaid jagada kolme gruppi (koordinaatsüsteemi järgi): Cartesiuse koordinaatsüsteemiga, polaarse (silindrilise) koordinaatsüsteemiga ja spetsiaalse konstruktsiooniga. Kõige levinumad on kolmedimensioonilise Cartesiuse koordinaatsüsteemiga mõõtemasinaid. Cartesiuse koordinaatsüsteemi näidis on esitatud joonisel 1.5 [2, 3, 6]:



Joonis 1.5. Cartesiuse koordinaatsüsteem [9]

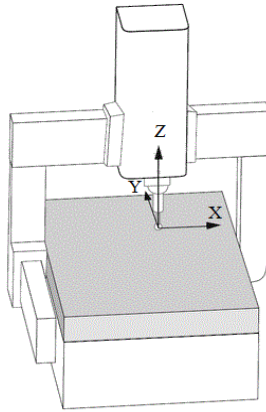
Cartesiuse koordinaatsüsteem koosneb kolmest teljest X, Y ja Z, mille koordinaadid määravad kõigi punktide asukoha. Telgede paariline kogum loob koordinaatpinnad XY, ZX ja YZ. Cartesiuse koordinaatsüsteemiga mõõtemasinate hulka kuuluvad portaal-, sild- ja kang-tüüpi mõõtemasinaid [10].

Silindrilise koordinaatsüsteemiga mõõtemasinate konstruktsioonis kasutatakse peamiselt pöördlauda või spindlit. Detail paigaldatakse ning pannakse pöörlema ja mõõdetakse nii vertikaalselt kui ka horisontaalselt sõltuvalt sellest, kuidas on konkreetne mõõtemasin konstrueeritud. Kõige kiiremini arenevad Cartesiuse koordinaatsüsteemiga mõõtemasinaid ja koos sellega kasvab ka nende täpsus. Silindrilise koordinaatsüsteemiga mõõtemasinaid kasutatakse spetsiaalsete ülesannete jaoks, eelkõige pöördkeha-tüüpi detailide ja hammasketaste kontrollmõõtmiste jaoks. Alternatiivseks lahenduseks peetakse võimalust kasutada pöördlauaga varustatud Cartesiuse koordinaatsüsteemiga mõõtemasinaid [6, 7].

Spetsiaalse konstruktsiooniga koordinaatsüsteeme kasutatakse mõõtekäte/robotite jaoks, sest selliste mõõtemasinate eripäraks on liigendiliselt seotud putkelised elemendid. Mõõtekätel on suur mõõteruum, nad on mobiilsed ja kompaktsed. See võimaldab mõõta detaili otse pingis või kasutuskohas. Mõõtekäte peamiseks puuduseks on madal mõõtetäpsus võrreldes koordinaat-mõõtemasinaga [6, 7].

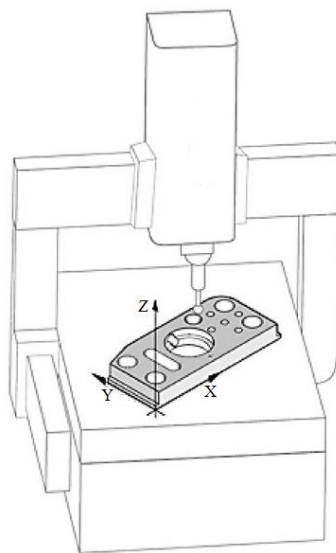
Koordinaat-mõõtemasinaid kasutatakse laias suuruste ja konstruktsioonide vahemikus. Mõõtemasinat saab juhtida kas käsitsi või automaatselt. Selleks et mõõtemasina liigutustest paremini aru saada, tuleb saada ülevaade mõõtemasinate koordinaatsüsteemidest, mida on kahte tüüpi [2, 6]:

1. Masina koordinaatsüsteemis vastavad teljed X, Y ja Z masina liigutustele. Kui vaadata masinat eestpoolt, siis vasakult paremale on suunatud X-telg, tagant ette Y-telg ja alt üles Z-telg, mis on otseloodis telgedele X ja Y [6]. Antud koordinaatsüsteem on kujutatud joonisel 1.6.



Joonis 1.6. Mõõtemasina koordinaatsüsteem [6]

2. Detaili koordinaatsüsteemis on kolm telge seotud baaspunktide või detaili baaselementidega. Enne kui alustada mõõtmist CAD-mudeliga või ilma, tuleb detaili koordinaatteljed joondada vastavalt mõõtemasina koordinaattelgedele, et detaili ja masina koordinaatsüsteemid asuksid teineteisega paralleelselt. Juhul kui mõõdetav detail on ümara vormiga või keerulise kontuuriga, muutub mõõtmisülesanne väga keerukaks ja vaevanõudvaks [6].



Joonis 1.7. Detaili koordinaatsüsteem [6]

1.3. Koordinaat-mõõtemasinate mõõtetäpsus

Mõõtemasina tähtsaimaks omaduseks on mõõtetäpsus. Alati enne mõõtemasina ostmist peab kasutaja selle erinevaid tehnilisi omadusi võrdlema [2].

Koordinaat-mõõtemasinate kasutuse ajal tekkivate mõõteviga põhjused on järgmised: mehaanilisest osast tulenev mõõteviga, mõõtmisüsteemist tulenev mõõteviga, mõõtmispinna kontaktist tulenev mõõteviga, ümbritseva keskkonna mõjust tulenev mõõteviga, mõõtmismetoodikast tulenev mõõteviga [2, 3].

Mehaanilisest osast tulenev mõõteviga sõltub koordinaat-mõõtemasina jaoks tehtavate komplekteerivate täpsusest, juhikute tegemise täpsusest, juhikute hõõrdumisest, lõtkude olemasolust ning mõõtemasina kõikide liikuvate osade tootmises kasutatavate materjalide valikust ja kvaliteedist. Samuti pööratakse palju tähelepanu vibroisolatsioonile, juhul kui mõõtemasin ei asu otseselt tootmistehhis või vibrokoormatud seadmete lähedal. Informatsiooni mehaanilise mõõtevea kohta annab mõõtemasina tootja [3,8].

Mõõtmisüsteemist tulenev mõõteviga sõltub mõõtmisüsteemist ja seda peetakse süstemaatiliseks mõõteveaks. Suuremal määral on see kompenseeritav kohaste paranduste sisestamisega, pärast nii mõõtemasina kui ka mõõteotsiku kvalifitseerimistulemust. Mõõtmisüsteemist tulenev mõõteviga sõltub mõõtmisaskaalast, mõõtmisaskaalalt asendeid lugivate andurite täpsusastmest, koordinaatide lugemise paralleelsest hälbest mõõtemasina koordinaattelgede suhtes [8].

Mõõtmispinna kontaktist tulenev mõõteviga hõlmab mõõteotsiku kindlaid deformatsioone, mõõteotsiku kuuli hoidiku kõverust. Kasutuses on mitu mõõtepeade ja mõõteotsikute liiki, mille erinevused seisnevad nende tüübis ja täpsuses. Mõõtmispinna kontaktist tulenev mõõteviga sõltub mõõtepea valikust ning mõõteotsiku tüübist ja pikkusest [8].

Keskkonna mõjust tulenev mõõteviga tuleneb masina elementide ja mõõdetava objekti deformeerumistest, mis omakorda tulenevad temperatuurist, õhuniiskusest ja mõõtemasina asukoha vibratsioonist. Õhuniiskus mõjub suuremal määral mõõtemasina graniidist

valmistatud sõlmede deformatsioonile. Mõõtemasina vibratsioon toob kaasa lühiajalisi mõõtesüsteemide ja skaalade nihkumisi. Nüüd on juba võimalik arvestada temperatuuri mõju mõõteveale, kasutades temperatuuriandurit, mis paigutatakse mõõdetavale detailile. Ülesande lahendamiseks on vaja enne detaili mõõtemasinal kontrollimist oodata, kuni mõõtemasina ja mõõdetava detaili temperatuur võrdsustuvad. Seda mõõteviga võib põhjustada ka detaili vale paigaldus, juhul kui seda deformeeriti otseselt mõõtelauale paigaldamise ajal [10, 20].

Mõõtmismetoodikast tulenev mõõteviga. Mõõtemasinal mõõdetakse eraldiseisvate punktide koordinaatasendeid ruumis. Mõõdetava objekti kõiki punkte ei ole võimalik mõõta, mis tähendab, et alati on võimalik asend, millel tolerantsi väljaspool olevad punktid ei ole mõõdetavad. Näiteks selleks, et mõõtemasina diameetrit mõõta, tuleb vaid kolme punkti kasutada ning mõõtemasina kontrolleri oskab konstrueerida ringjoone kolme punkti järgi. Kuid ümaruse vormist hälbe mõõtmisel saadakse ebatäpne tulemus. Praegu on olemas hea võimalus selle ülesande lahendamiseks ja selleks on skaneerimisrežiim. Skaneerimisrežiim mõõdab maksimaalset võimalikku punktide kogust minimaalse vahega teine teiselt. Veel üheks võimaluseks peale skaneerimisrežiimi on suure punktide koguse mõõtmine. Teine mõõtmismetoodikast tulenev mõõteviga on seotud tulemuste töötamise algoritmiga ja koordinaatsüsteemi õige ülesehitusega. Koordinaatsüsteemi ülesehituseks kasutatakse mõõdetava detaili õigeid baaspindu. Mõõdetavat geomeetrilist figuuri võrreldakse ideaalse geomeetrilise figuuri mõõdetega, külgnervate pindade või baaspindade mõju on väga suur [20, 21].

Mõõtevigate vähendamiseks kasutatakse nii igapäevast mõõteotsiku kvalifitseerimist edaspidise kompenseerimisega kui ka mõõtemasina kalibreerimist, samuti tehakse parandusi mõõtmiste täpsuse suurendamiseks. Standard ISO 10360 määrab tehnilised omadused ja kontrollimeetodid. Mõõtemasinate kontrollimist või kalibreerimist teostatakse kahe parameetri ehk kontaktse mõõtevea ja pikkuse mõõtmise mõõtevea järgi [10].

Selleks, et mõõteviga minimeerida, tuleb jälgida, et ümbritseva keskkonna temperatuur oleks 20 °C lähedal, kõik mõjutavad mehaanilised mõõtevea faktorid oleksid järgitud ja kontrollitud. Mõõdetava objekti temperatuur tuleb meeles pidada, sest see mõjutab mõõtmistulemust [12].

1.3.1. Koordinaat-mõõtemasina kalibreerimine

Absoluutmõõtevea määramiseks kasutatakse dokumente, mis reglementeerivad koordinaat-mõõtemasinate erinevate konstruktsioonide meetodeid ja vahendeid. Mõõtemasinate kontrollimisel juhindutakse rahvusvaheliste standartide grupist ISO 10360. Koordinaat-mõõtemasina mõõtmiste töödiapasooni kontrollimisjuhend on loodud võimalikul mõõdetaval diapasoonil tootja lubatud mõõtevea korral [6, 10].

Koordinaat-mõõtemasina ja selle mõõtesüsteemi kontrollimiseks on olemas mitu arusaama, mida tihti segi aetakse: kalibreerimine, kontrollimine ja kvalifitseerimine. Väga tihti nimetatakse mõõteotsiku kvalifitseerimist ekslikult mõõteotsiku kalibreerimiseks. Ülesannet, mida mõõtemasina operaator iga päev teeb, nimetatakse mõõteotsiku/mõõtesüsteemi kvalifitseerimiseks. Koordinaat-mõõtemasina kontrollimisel saadakse aru, kas see vastab tootja spetsifikatsioonile või mitte. Seda tehakse 1–2 korda aastas sõltuvalt tootja soovituselt. Koordinaat-mõõtemasina kalibreerimiseks nimetatakse mõõtemasina kõikide kinemaatiliste vigade määramist. Seda teostatakse mõõtemasina paigaldamisel või vajadusel (näiteks mehaaniliste vigastuste korral) [6, 10].

Põhilised katsed, mida tehakse koordinaat-mõõtemasina kontrollimiseks, on kirjas standardis ISO 10360-2. Sellel standardil on kolm põhilist tehnilist eesmärki:

- vea kontrollimine mõõtesüsteemi pikkusemõõtmete tulemuste kohta, jättes mõõteotsiku asukohta muutmata;
- vea kontrollimine mõõtesüsteemi pikkusemõõtmete tulemuste kohta mõõteotsiku asukoha antud nihkega;
- vea kontrollimine kordavate pikkusemõõtmete kohta.

Need katsed annavad täpse informatsiooni selle kohta, kuidas koordinaat-mõõtemasin hakkab tööprotsessis pikkust mõõtma [10].

Standard ISO 10360 määrab kalibreerimise standardi materjali, mõõtme ning isegi vormi. Näiteks oli ISO 10360 standardi eelmistes versioonides oli soovitus kasutada astmelist kaliibrit või otsmõõte, mis vastavad ISO 3650 geomeetrilisele spetsifikatsioonile pikkusstandardite jaoks. Juhul kui kalibreerimise jaoks kasutatakse otsmõõtude komplekti, siis peaks kõige pikema otsmõõdu pikkus olema mitte lühem kui 66% koordinaat-

mõõtemasina diagonaali maksimaalsest tööpikkusest. Kõige lühem pikkusestandard on 30 mm. Juhul kui kasutatakse astmelist kaliibrit, on astmelise kaliibri pindade vahel olevad vahemaad kokku lepitud. Selleks et olla kindel koordinaat-mõõtemasina kalibreerimise korrektsuses, peab kasutaja mõõtemasina kontrolli teostamiseks valitud kalibreerimise standarditele antud sertifikaadi aktuaalsust kontrollima. Kui kalibreerimise standard asub ruumis, mille temperatuur võrreldes kontrollitava koordinaat-mõõtemasinaga on kõrgem või madalam, on vaja anda piisavalt aega selleks, et kalibreerimise standardi temperatuur võrdsustuks ümbritseva keskkonna temperatuuriga, kus asub koordinaat-mõõtemasin [10, 23].



Joonis 1.8. 1 – mõõted astmelise kaliibri abil; 2 – otsmõõtude kalibreerimise komplekt [10]

ISO 10360-2:2009 uuendatud versioonis saab kahesuunaliste pikkusemõõdete jaoks kasutada otsmõõtude komplekti, astmelist kaliibrit, kalibreerimissfääriga standardeid või laserinterferomeetrit. Kõik pikkusestandardid peavad olema kalibreeritud vastava natsionaalstandardi järgi. Kalibreerimise ajal tuleb mõõta ümbritseva keskkonna temperatuuri, kuna see mõjutab mõõtmistulemust. Temperatuuri mõju mõõtmistulemusele nimetatakse termolaiendi koefitsiendiks. Näiteks kui teostatakse kalibreerimist terasestandardite abil ja temperatuur on kõrgem kui normeeritud temperatuur 20 °C, tuleb kasutada järgmist valemit 1.1 [10]:

$$L_{20} = L_T + (20 - T) \times \alpha \times L_T \quad (1.1)$$

kus L_T – on mõõtetulemus

T – temperatuur mõõteprotsessil

α – termolaiendi koefitsient, terase jaoks on selleks $11,6 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$

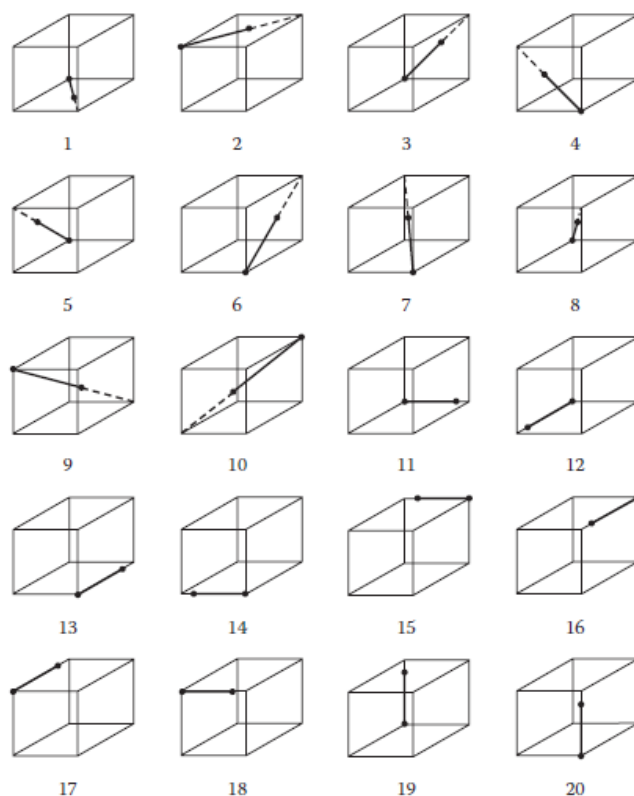
Näiteks kui pikkuse mõõtmistulemuseks on 300,022 mm, ja mõõteid teostati ruumis temperatuuriga 23,6 °C, saab pikkuse mõõtmistulemuseks:

$$300,022 + (20-23,6) \times 11,6 \times 10^{-6} \times 300,022 = 300,009 \text{ mm, tulemus on ümardatud 0,001}$$

Koordinaat-mõõtemasina mõõtevea pikkusenäitajad fikseeritakse mikronites ja tähistatakse sümboliga E_L . Mõõtmised teostatakse kahel paralleelsel pinnal ning pikkuse mõõtmiseks kasutatakse kahte vastandlikku punkti. Koordinaat-mõõtemasina tootja annab ette maksimaalse mõõtevea pikkusenäitajate jaoks X-, Y- ja Z-teljele. Andmeid saab esitada nii tabeli kui graafikuna[10].

Axiom Too koordinaat-mõõtemasinat kalibreeritakse ASME B89.4.1b-2001 standardi järgi. Antud standard hõlmab endas paari tehnilist omadust, mis on vajalikud koordinaat-mõõtemasina täpsuse kontrollimiseks [10]:

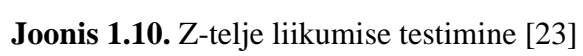
- Mõõdete korduvus. Korduvustest tähendab koordinaatide, nullpunkti ja kalibreerimissfääri mõõtmist. Selleks teostatakse kümme järjestikust sfäärikeskuse mõõtmist, milles kasutatakse iga mõõtmise jaoks vähemalt nelja punkti, mis on vajalikud sfääri matemaatiliseks konstrueerimiseks. Kalibreerimisraportis tähistatakse seda testi sümboliga $R_{Pt,MPE}$, kus Pt on kordustesti tulemus. Tähtis on kasutada mõõtmiste jaoks üht mõõtmisstrateegiat ja samu tingimusi. Testis teostatakse süstemaatilist sfäärikeskuse määramist kümne järjestikuse mõõtmise abil ning testi eesmärgiks on konkreetsetes töötingimustes juhuslike vigade avastamine. Korduvus aetakse tihti segi mõõtmise täpsusega. Tähtis on teada, et koordinaat-mõõtemasin omab nii teatud kiirust, millega ta läheneb oma mõõteotsikuga sfäärile, kui ka mõõtepunkti kontaktijõudu. Selle poolest erineb see masin manuaalsest koordinaat-mõõtemasinast, mida juhib operaator [10, 24].
- Joonnihke täpsus. Seda testi tehakse pikkuse mõõtevea määramiseks. Joonnihke testi tuleb teha kalibreeritud astmelise kaliibri või kalibreeritud laserinterferomeetri abil. Test koosneb kümne eri pikkuse mõõtmisest, mis on mõeldud koordinaat-mõõtemasina iga telje jaoks. Vajalik on määrata mõõteviga mõõtemasina ja kalibreerimistööriistade tulemuste vahel. Mõõtmiste diapsoon peab olema maksimaalne, lähtudes mõõtmiste töötasapinna andmetest koordinaat-mõõtemasina X-, Y- ja Z-telje järgi. Mõõtmisprotsessi tuleb kolm korda korrata ning kalkuleerida keskmine tulemus [23, 24].
- Tootmisvõime testi saab teha vähemalt 100 mm pikkusega otsmõõttude abil või kahe sfääriga otsadel kalibreerimiseabiga. Nende asetamiseks on olemas 20 võimalust.



Joonis 1.9. Kontrollimisplanki 20 asetamisvõimalust [24]

Antud kontrollimisviisi saab läbi viia iga asetamisvõimalusega kuni kuus korda. Vajadusel saab kasutada ka temperatuuri hüvitamise andurit, juhul kui koordinaat-mõõtemasinal on selline funktsioon. Antud testi tehakse ruumilise vahemaa määramiseks sfääride vahel. Sfääri diameeter selles testis pole arvestatav ja võib olla ka lubatud hälbe. Sfääride mõõtmisel tuleb kasutada võrdset punktide arvu ja asetamist sfääride peale [23, 24].

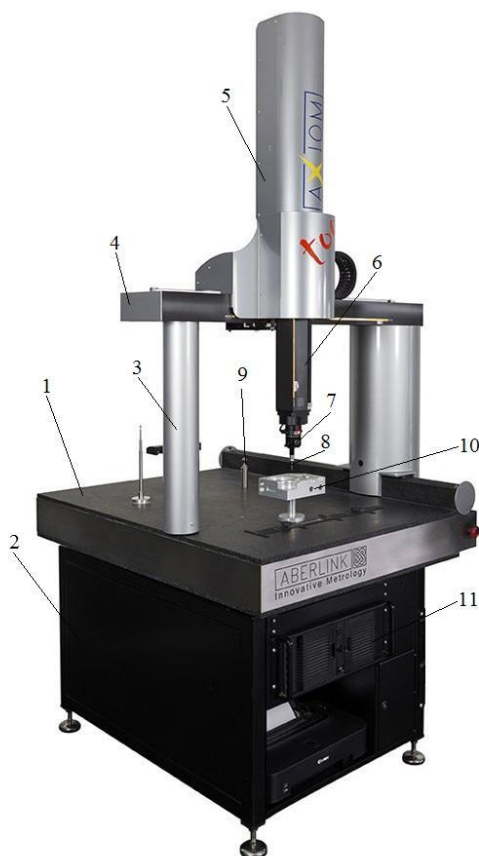
- Ruumiline test mõõtepea nurga pöörde kasutamisega. Selle testi raames tuleb kaks korda mõõta sfääridega planki eri tasapindadel. Esimese sfääri mõõtmise ajal tuleb keerata mõõtepead 45° võrra. Sfääri teine mõõtmine tuleb samuti nurga all teha, mõõtepea peab olema 180° pööratud. See test kontrollib nihet Z-teljel. Teise sfääri mõõtmine käib samal viisil. Joonisel 9 on kujutatud mõõtepea asetamise võimalused. Esimese sfääri mõõtmine on tähistatud numbriga 1 ja teise mõõtmine numbriga 2. See test on identne testiga rahvusvahelisest standardist ISO 10360, osa 3 [23, 24].



2. KOORDINAAT-MÕÕTEMASINA ELEMENDID

2.1. Mõõtemasina põhielemendid

Koordinaat-mõõtemasina põhikonstruktsiooni kuuluvad järgmised elemendid, mis on esitatud joonisel 2.1:



Joonis 2.1. Koordinaat-mõõtemasina põhielemendid: 1 – mõõtelaud; 2 – tugiraam; 3 – mõõtemasina post; 4 – mõõtemasina traavers; 5 – mõõtemasina kelk; 6 – mõõtemasina varras; 7 – mõõtepea pöörlev osa; 8 – mõõtepea mõõdetav osa; 9 – sfäär mõõteotsiku kvalifitseerimiseks; 10 – mõõteobjekt; 11 – mõõtetulemust registreeriv seade [3, 6]

Koordinaat-mõõtemasina konstruktsiooni baaselementiks on mõõtelaud, millele on paigaldatud nii enamik liigutatavaid kui mitteliigutatavaid masinasõlmi kui ka mõõdetav objekt (detail). Mõõtelaud pannakse vajaliku kõrgusega tugiraamile või kolme alustoeaga raamile. Tugiraam omakorda paigaldatakse vundamendi peale mõõtemasina stabiilsuse paigalduse tagamiseks ning mõõtemasina horisontaalse asendi justeerimise lihtsustamiseks. Õigesti paigaldatud mõõtemasina horisontaalne asend on vajalik raskusjõu mõju vähendamiseks konstruktsiooni elementidele. Mida suurem on mõõtemasina mõõtelaua

mass, seda vähem allub see vibratsioonile. Vibratsiooni saab vähendada, paigaldades vibroisolatsiooni, näiteks sobivad selle eesmärgiks pneumaatilised vibroisolatsioonitoed [3, 6].

Praegu on tööstuses kõige levinumaks mõõtelaua liigiks kõva kivi mõõtelaud. Mõõtemasina mõõtelaud on tavaliselt valmistatud graniidist. Temperatuuri muutudes deformeerub graniidist mõõtelaud märgitavalt vähem kui näiteks malmist või terasest mõõtelaud. Graniidist mõõtelaua on kaks puudust, mis võivad pinna muutusi esile tuua: nende kõrge sisseimbumine ja kalduvus paisuda. Just sellepärast tuleb graniidi mõõtelaudade eksploatatsiooni ajal jälgida ümbritseva keskkonna niiskust [3, 6].

2.2. CMM-i telgede liikumised

Parameetreid, mis määravad suuremal määral mõõtemasina täpseid omadusi, teostatakse koordinaatmõõtemasina liikumise sõlmede abil. Koordinaatmõõtemasina telgede liikumise põhielementideks on toed ja juhikud [3].

Mõõtmistehnikas kasutatakse kõige sagedamini kolm tüüpi tugesid:

1. Aerostaatilised toed. Tööprotsessil tekib aerostaatilise toe ja pinna vahele kokkusurutud õhukelme paksusega 4–6 mkm. Kuna toe ja juhiku vahel pole kontakti, on hõõrdumise koefitsient peaaegu võrdne nulliga ega sõltu liikumise kiirusest. Elementide liikumine toimub ladusalt ja sujuvalt. Aerostaatilised toed on lihtsad kasutada ega nõua erilist hooldust. Juhikute tolmust puhastamine toimub tänu alati voolavale kokkusurutud õhule. Antud tugede puuduseks on vajadus alati kokkusurutud õhku ette anda, mis peab olema vajaliku rõhu ja kvaliteediga. Selliste tugede töötamiseks on vaja paigaldada kokkusurutud õhu ettevalmistamise süsteem [3].
2. Kiikumised. Kiikumiste tuges võib kasutada standardseid rull- või kuullaagreid ning kiikumise keha rollis kasutatakse mitmes reas olevaid kuule. Selliste liikumistugede puuduseks on hüstereesisilmus vastasuunalise liikumise ajal, mis ilmneb koormiste ümberjaotumisel laagri elementidele [3, 6].
3. Libisemisi kasutatakse mõõtemasinaates väga harva, näiteks väikesegabariidilistes aeglastes mõõtemasinaates. Libisemiste puudusteks võib nimetada seda, et nad vajavad

tõstmiseks palju jõudu, nõuavad pinna spetsiaalset hooldust ja pidevat määramist. Hõõrdumise koefitsient sõltub liikumise kiirusest [3, 6].

2.3. Telgede liikumise ajamid

Mõõtemasina liigutatavate elementide nihutamiseks teostamiseks kasutatakse väga tihti elektrijameid. Tavaliselt koosneb ajam järgmistest osadest: elektrimootor, reduktor ja käik liikumise jaoks. Elektrijamid peavad mõõtemasina liigutatavaid sõlmi nihutama etteantud trajektoori järgi, võimaldama kiiret pidurdamist ja sõlme reversiivset liikumist. Elektrijamid, mis paigaldatakse liigutatavate sõlmede juhtimiseks, peavad olema järgmiste omadustega [3, 6]:

1. kiire toimimine ja sujuv liikumine kiiruste laiades diapsoonides;
2. minimaalne soojuskiirgus ja kompaktsus;
3. vibratsiooni ei tohi tekitama;
4. suurepärased dünaamilised omadused.

Elektrimootorid on paigaldatud kantava aluse küljele vibroisoleerivate tugede läbi ning reduktori juurde ühendavad elektrijamid hammasrihma abil. Tavaliselt kasutatakse alalisvoolu elektrijameid kõrgemomendilise tahhogeneeraatori ja stamprootoriga. Liigutatavate sõlmede liikumise tüüp määratakse nende massi ja juhtimisrežiimide järgi [2, 3, 6].

Keskmise ja väikese gabariidiga mõõtemasinate jaoks kasutatakse lindilisi liikumise elektrijameid (liikumine toimub hammasrihma ja hammasratta abil) või keere-mutter tüüpi keerdatajameid, mis on näidatud joonisel 11.



Joonis 2.2. Y-telje liikumine, keere-mutter tüüpi mõõtemasin Mitutoyo BHN305

Rihmakäikude lai kasutus on põhjustatud nende madalast maksumusest, hõlpsast kättesaadavusest ja lõtkude puudumisest. Samuti on mõõtemasinate elektriagamite reduktorid kasutatavad väändemomendi suurendamiseks [3, 6].



Joonis 2.3. Väändemomendi suurendamine ajamireduktori abil, mõõtemasin Johansson Cordimet 800

2.4. Liikumise joonandurid

Mõõtemasinate liikuvate elementide nihkumise suuruse määramiseks punktide koordinaatide mõõtmisel kasutatakse koordinaatliikumise andureid. Mõõtemasina koordinaatliikumise täpsuse ja kiire toimimise määramiseks on loodud liikumise joon- ja nurgaandurid. Nende andurite põhinäitajateks on kasutuse eripärad, millesse kuuluvad tundlikkuse aste ümbritseva keskkonna temperatuurimuutuste, niiskuse elektriliste ja magnetakistuste vastu. Samuti andurite parameetrik on mõõteviga, konstruktsioon ja loendamise diskreetsus [3, 6].

Suure täpsusega koordinaat-mõõtemasina jaoks on loendamise diskreetsuse tüüpiliseks tähenduseks väärtus 0,1 mkm 1 m mõõtmisel, sest näiteks keskmise täpsusega koordinaat-mõõtemasinate jaoks on väärtus 0,5 mkm 1 m mõõtmisel [3].

Koordinaatliikumise andureid on kahte tüüpi: absoluutsed ja relatiivsed. Eristamine toimub nihkeväärtuse määramise viisi järgi. Relatiivset tüüpi andurid on võimelised ainult suhtelist liikumist määrama, sest nad loendavad impulsside arvu. Juhul kui andur on kas või hetkeks ilma pingeta jäänud, tuleb teostada telje nullile leidmise protseduuri, selleks et

impulsside arvesti ära nullida. See annab võimaluse kiiremas korras üles leida anduri rike, juhul kui mõõtemasina juhtimiskontrollerisse on sisse kirjutatud antud telje anduri süsteemis elektritoite katkestustega seotud vea kood. Absoluutsetes andurites on võimalik määrata absoluutset asukohast igas punktis, isegi kui andur oli ilma pingeta jäänud [2, 3].

Kõige suuremat koordinaatliikumise andurite levikut koordinaat-mõõtemasinate konstruktsioonides on saanud laserinterferomeetrid, induksioonandurid ja fotoelektrilised andurid [3].

Laserinterferomeetrid on leidnud suurimat kasutust joonnihkumistes; mõõtemasinate konstruktsioonides esinevad nad harva, pigem kasutatakse neid laserprojektorites. Harilikult kasutatakse seda tüüpi andureid kalibreerimise abivahendina, sest nad omavad täpsuse erilist taset. Laia kasutust ei ole nad leidnud ka kõrge hinna tõttu [6].

Fotoelektrilisi andureid kasutatakse kõige enam koordinaat-mõõtemasinate seeriatööstuses. Need andurid saab jagada tööpõhimõtte järgi kaheks rühmaks. Esimese rühma andurid töötavad peegelvalguses, teise rühma andurid aga läbilastud valguses. Tänapäeval kasutatakse koordinaatliikumise määramiseks rohkem teise rühma andureid. Joonisel 2.4. on kujutatud seda tüüpi anduri konstruktsioonsüsteemi näide [3, 6]:



Joonis 2.4. Läbilastud valguses töötava fotoelektroonilise anduri lähivaade mõõtemasin Mitutoyo BHN305 näitel

Fotoelektriline andur töötab valgusvooluse modulatsioonil. Mõõtesüsteemi täpsuse määramise põhielemendiks on mõõtejoonlaud, mis omab perioodiliselt muutuva struktuuri

võrdse laiuse piirkondadega. Struktuur omab valguse erineva peegelduse või läbilaskmise astet. Joonisel 2.4. on kujutatud klaasist mõõtejoonlaud paaris fotoelektrilise anduriga. Antud seos tagab kõrgeima mõõtetäpsuse. Kujutatud anduri ja mõõtejoonlaua moodul omab korpus, mis peab süsteemi tolmuterade joonlaua peale sattumise eest kaitsma. Kasutusprotsessi ajal tuleb mõõtejoonlaua ja andurite optiliste akende pindade puhtust jälgida. Selle süsteemi minimaalseks mõõteveaks on ainult 1–2 mkm 1 m mõõtmisel [2, 3, 6].

2.5. Mõõtepead

Koordinaat-mõõtemasina tähtsaimateks sõlmedeks on mõõtepead, sest nad mõjutavad kas kontaktset või kontaktivabalt mõõdetavat objekti-detaili. Mõõtepead on nagu liikumise mõõtemuundurid, mis määravad mõõtemasina täpsuse, universaalsuse ja tootmisvõime. Mõõtepead on jagatud kaheks tüübiks: need, mis mõjutavad mõõdetavat objekti, ning need, mis ei oma mehaanilist vastastikmõju [2, 3].

Kontaktivaba mõõtepead kasutatakse tavaliselt robotite abil mõõteülesannete tegemiseks. Nende mõõtepeade eelisteks on mehaanilise mõju puudumine mõõdetavale detailile ning kõrge tootmisvõime, mille tulemuseks on see, et lühikese aja jooksul saab mõõta suurt hulka punkte. Kontaktivaba mõõtepea puudusteks on mõõtmiste vähene täpsus võrreldes kontaktsete mõõtepeadega, tundlikkus mõnede ümbritseva keskkonna tegurite suhtes ning mõõtmisprobleemid raskelt ligipääsetavates piirkondades [7].

Kontaktivabade mõõtepeade tüübid [11]:

1. **Ruumilised skannerid** mõõdavad suurt punktide hulka, kus igal punktil on kolm koordinaati. Üheks koordinaadiks on vahemaa mõõtepea ja mõõdetava objekti vahel ning koordinaadid, mis iseloomustavad asukohta skaneeritava alal [7, 11].
2. **Lineaarsed skannerid** mõõdavad suurt punktide hulka, mis on paigaldatud ühele skaneeritava ala pinnale. Igal punktil on vaid kaks koordinaati, asukohta joonpinnal ja vahemaad skaneeritavast mõõtepeast [7, 11].
3. **Punktilised skannerid** mõõdavad ühe punkti asukohta [11].

Väikse pinnakaredusega detailidel on madal peegeldusvõime ning nende peegeldusvõime parandamiseks kasutatakse erilisi katteid. Enne mõõtmist kaetakse mõõdetav pind spetsiaalse värviga. Kuid värvi ebaühtlane paksus vähendab oluliselt mõõtmise täpsust. Skaneerivad mõõtepead on kasutusel eelkõige suuregabariidilise detailide või konstruktsioonide tootmises, kus toodetakse stants- või valudetaile. Kontaktivabade mõõtepeade peamisteks tootjateks on Mitutoyo, Hexagon, Zeiss jt. Joonisel 2.5.1. on kujutatud kontaktivaba mõõtepea firmalt Mitutoyo [2, 11].



Joonis 2.5. Mitutoyo kontaktivaba lasermõõtepea [11]

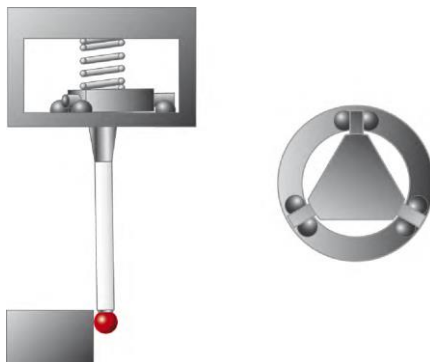
Kõige rohkem kasutatakse kvaliteedikontrollis kontaktseid, mõõdetavat objekti mehaaniliselt mõjutavaid mõõtepeasid [11].

2.5.1. Puutetundlikud mõõtepead

Puutudunlikke või nullisi mõõtepeasid kohtab mõõtesüsteemides tihti. Nendes mõõtepeades tekib mõõtepingutus mõõteotsiku ja mõõdetava objekti pinnaga kontakti ajal või muudab mõõteotsiku kerge liigutus tundliku elemendi seisundit, mis annab elektrisignaali ning kujundab käsu, mida edastatakse mõõtemasina kontrollerrisse. Kontrollerr loeb jooksvat koordinaati. Tundlike elementide seas on elektrikontaktid ning piesoelementid [11].

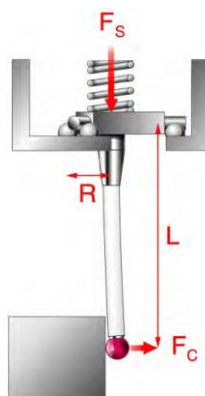
Kõige levinumateks mõõtepeadeks on tööstuseks ja eri klassi täpsuse määramises kasutusel just sisemiste elektrikontaktidega mõõtepead. Mõõteotsik paigutatakse sellistesse

mõõtepeadesse kolme pöördkeha ja kolme prismaatilise keha kaudu, mis on ühtlaselt asetatud ringjoonele teineteise suhtes sammuga 102° [7, 11].



Joonis 2.6. Puutetundlik mõõtepea skeem, sisemiste elektrikontaktide asetsemine [11]

Pöördkehasid paigutavad kuulid ja silindrid on kinnitatud mõõtepea detailidele isolaatorite kaudu ning ühendatud elektrijadavooluringiks. Mõõteotsiku otsaku nihke korral puudutab mõõteotsik mõõdetavat objekti ning üks silindritest eraldub kuulidest. Selle tagajärjeks on elektrijadavooluringi katkemine, mille järel ilmub käsk, mis edastatakse mõõtemasina controllerile. See tähendab, et toimus mõõteotsiku otsaku kontakt mõõdetava objektiga. Elektrikontakti katkestamiseks on vaja vähest pingutust. Joonisel 2.7 on kujutatud mõõdetava detaili mõõteotsikuga puudutamise protsess [7, 11].



Joonis 2.7. Puutedundlikud mõõtepead rakendusprotsessi ajal mõjutavad jõud [11]

Esialgseks nihkumiseks nimetatakse mõõteotsiku kõveruse astet triggeri rakendamise punktis. Triggerit rakendamise ajal mõjutavad jõud on esitatud valemis 2.1 [11].

$$F_c \times L = F_s \times R \quad (2.1)$$

F_c kontakti jõud genereerib kinemaatika momendi, millele vastustub vedru jõud F_s . Jõudude tasakaaluni jõutakse siis, kui $F_c \times L$ kontakti jõuga loodav moment on võrdne vedru jõuga loodavale momendile $F_s \times R$. F_c kontakti jõu koormus tekitab nõela kõveruse. Kõveruse suurust trigeri rakenduspunktis nimetatakse esialgseks käiguks. Esialgne käik sõltub mõõteotsiku suunast ja pikkusest (L). Vedru jõud (R) hakkab sõltuvalt mõõteotsiku otsaku puudutamise suunast muutuma [11].

Praegu on olemas palju konstruktiivseid modifikatsioone sisemiste elektrikontaktidega puutetundlikkudest mõõtepeadest. Nende erinevused seisnevad mitte ainult mõõtetudes, vaid ka rakenduspingutustes [3].

Olemas on ka trigeri hälbe mõõtepead, mis on tänapäevastes mõõtemasinate kasutusel. Antud mõõtepeade tüüp annab erinevalt nullistest puutetundlikkudest peadest võimaluse määrata mõõteotsiku nihkumise suurust mõõtepea korpuse suhtes tänu sisse ehitatud mõõtemuunduritele [3, 5].



Joonis 2.8. Trigeri hälbe mõõtepea ehk skaneeriv mõõtepea [11]

Antud mõõtepea tüüp võimaldab mõõtmist mõõdetava objekti skaneerimise teel: tuleb valida skaneerimisrežiim, mis on katkestamatu kontakt mõõteotsiku otsaku ja detaili vahel mõõtepea nihkumise protsessis. Tänu mõõteotsiku hälbe võimalusele fikseerib mõõtemasina kontrollir mõõteotsiku hälbe kindla sagedusega ning määrab mõõteotsiku otsaku keskpunkti

asukohta. Antud mõõtmiste liik annab võimaluse märgatavalt suurendada mõõtmiste tootlust ja täpsust ning mõõta vormilt keerulisi kõverjoonelisi pindu [5, 11].

Skaneeriva mõõtepea konstruktsioonis kasutatakse mõõtemuunduritena passiivseid sensoreid, induktsoon- ja optoelektrimuundureid, tensoandureid. Need mõõtepeade tüübid on leidnud laia kasutust, neid toodetakse ja paigaldatakse aktiivselt kõige tänapäevasematesse mõõtemasinate, näiteks Mitutoyo, Hexagoni ja Zeissi toodetesse [5, 11].

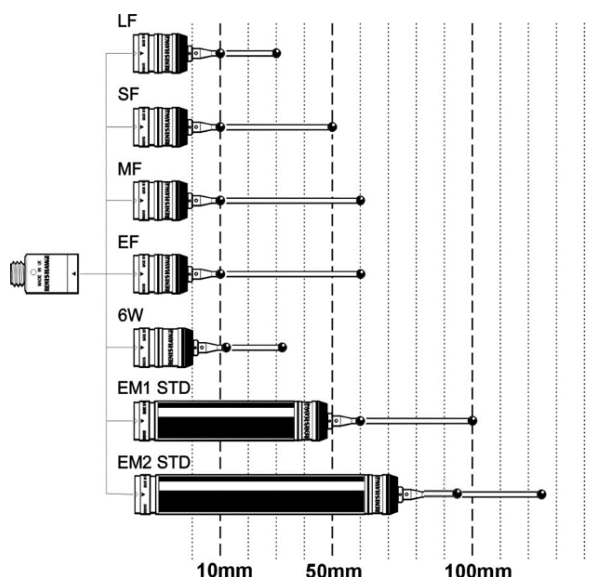
2.5.2. Renishaw TP20 mõõtepea

Tänapäeval on trigeri-tüüpi mõõtemasinate seas standardiks mudel TP20 firmalt Renishaw. Selle mudeli eripäraks on väikesed gabariidid, väike mass ning kasutuse ja paigalduse lihtsus. Antud mudelil on kuut liiki kontakt-mõõtemoodulid, kus iga moodul on markeeritud eri värviga ning on kasutatav kindla mõõtmisülesande jaoks. Moodulid liigitatakse rakenduspingutuste järgi [7,14]:

1. SF – standardne rakenduspingutus, antud mooduli võru on musta värvi, mõõteotsiku paigaldatavaks pikkuseks on 10 kuni 50 mm [14].
2. LF – madal rakenduspingutus, selle võru on rohelist värvi. Kõige paremini sobib see kummist detailide, nt kummist tihendite mõõtmiseks [14].
3. MF – keskmine rakenduspingutus, võru on halli värvi. Kasutatakse juhul, kui standardne pingutus pole piisav [14].
4. EF – suurendatud rakenduspingutus, selle võru värviks on oranž. Kasutatakse mõõteotsikute suurte konfiguratsioonide ning vibratsioonist tingitud väärrakenduste korral [14].
5. 6W – kuueteljeline helesinise võruga moodul. Kasutatakse Z-suunal, nt detaili sisesoone laiuse mõõtmiseks [14].
6. EM1 STD ja EM2 STD – pikendused vastavalt 50 ja 75 mm. Kasutatakse enamasti mõõtmisteks, mis nõuavad pikendust pikkusega 50 või 75 mm [14].

Kõik mõõteotsikud kinnitatakse mõõtepea külge M2 keermekinnituse abil ning pikendid kinnitatakse mõõtepea külge M8 keermekinnituse abil. TP20 koosneb paigaldusmoodulist, anduri korpusest ja vahetatavast kontaktmoodulist (mõõteotsiku kinnitamismoodulist), mis on omavahel ühendatavad punktpaigutusega magnetühenduse abil. Niisugune ühendus on

konstruktsiooni eripära, mis annab võimaluse vahetada kontaktmoodulit nii automaat- kui ka manuaalrežiimis. Sellisel juhul pole mõõteotsiku korduv kvalifitseerimine nõutav. Joonisel 2.9 on esitatud TP20 mudeli täielik komplekt mõõteotsikute pikkuse maksimaalsete tähendustega, mida saab paigutada nii pikendusega kui ka ilma [14]:



Joonis 2.9. Moodulite liigid ja pikendused [11]

On tähtis arvesse võtta, et erinev rakenduspingutus mõjutab mõõtetäpsust. Mida suurem on rakenduspingutus, seda väiksem on mõõtetäpsus. Vajalikud andmed on esitatud tabelis 2.1[14]:

Tabel 2.1. Rakenduspingutuse mõju täpsusele [14]

Mooduli tüüp	LF	SF/EM1/EM2	MF	EF	6W
Mõõteotsiku hälbe täpsus enne rakendamist (mkm)	± 0.60	± 0.80	± 1.00	± 2.00	± 1.50
Ühekülgne korduvus (mkm)	± 0.35	± 0.35	± 0.50	± 0.65	± 1.00

Juhtivas mõõtmisprogrammis võib olla kasutusel paar mõõteotsikut. Sel juhul on vaja kasutada eraldi liiki moodulit iga mõõteotsiku jaoks. Mooduli käsitsi vahetuse korral on garanteeritud 10 mm täpsusega ± 1 mkm mõõteotsiku otsaku keskpunkti korduv tagastus. Automaatvahetuse korral on täpsus ± 10.5 mkm. Mooduli vahetuseks tuleb ühitada sama markeeringut moodulil ja mõõtepeal. Moodulil ja mõõtepeal on magnetühendus, kus ühenduse pinnale võib ilmuda metallilaast või muu mustus [14].

2.5.3. Pöördeline mõõtepea

Pöördepead kasutatakse tavaliselt mõõtepea asendi muutmiseks ruumis. Pöördepea omaduseks on teatud nurgaga automaatpöörang, mis toimub ajami abil. Ajamit juhib omakorda mõõtemasina kontrollir. Tihti kasutatakse ka koordinaat-mõõtemasinaid, mis on mõõtepea manuaalse pööranguga. Pöörang tehakse käsitsi, fikseerides positsiooni ja nurga. Pöördepeal on tavaliselt kaks võimalikku pöörlemisastet, esimeseks on vertikaalsel ja teiseks on horisontaalsel tasapinnal pöörlemine [7, 11].

Käsitsi pööratava mõõtepea pööranguks on vaja lõdvendada pingutusseadet, paigaldada mõõtepead vajalikku positsiooni ning viia pingutusseade algasendisse. Käsitsi pöörlevate mõõtepeade nurga samm on tunduvalt väiksem, võrreldes automaatmõõtepeadega. Nende mõõtepeade eeliseks on maksumus. Automaatmõõtepead saab jagada kaheks tüübiks: indekseerivad ja interpoleerivad. Indekseerivates mõõtepeades toimub mõõtepea nihkumine lähteasendist ja lähteasendist fikseerimine. Kõige laiemalt levinud automaatmõõtepeadeks on firma Renishaw mudeli PH10T mõõtepead, mis on esitatud joonisel 2.10 [7, 11, 16]:



Joonis 2.10. Renishaw PH10T pöördenurga sammuks on $7,5^\circ$ [11]

Interpoleerivateks automaatmõõtepeadeks nimetatakse mõõtepeasid, milles on jälgimisajamid. Need mõõtepead võimaldavad realiseerida 5-koordinaatseid nihkumisi: kolm mõõtemasina põhiolemuse joonliikumist ning kaks mõõtepea pöörangut. Mõõtepea ajamid osalevad koordinaatliikumistes, nagu ka mõõtemasina liikumise põhiolemused. Nende

mõõtepeade peamiseks tootjaks on firma Renishaw oma mudeliga PH20, mis on esitatud joonisel 2.11 [11, 14]:



Joonis 2.11. Mõõtepea Renishaw PH20 [11]

See mõõtepea võimaldab mõõtmisprotsessi tootlikkust parandada, mõõtes suurt hulka punkte mõõdetaval objektil. Nihkumise arvu vähendamine lühendab mõõtmisaega. Automaatmõõtepeade ühendamiseks mõõtemasina kontrolloriga on tavaliselt vaja täiendava kontrolleri olemasolu. Automaatmõõtepeade kasutamisel tuleb arvestada sellega, et mõõtepea iga asendi vahetamise järel muutuvad mõõteotsiku otsaku keskkoha koordinaadid [7, 14].

2.6. Mõõtepea vahetusrakis

Praegusel ajal on võimalik mõõta detaili erineva diameetri ja pikkusega mõõteotsikutega. Mõõteotsiku automaatseks vahetuseks mõõtmise ajal saab kasutada erilisi mõõteotsikute vahetusrakiseid. Selle võimaluse on väga hästi realiseerinud Hexagon, mille automaatsete mõõtepeade mudel HH-A-T on esitatud joonisel 2.12 [11, 15]:

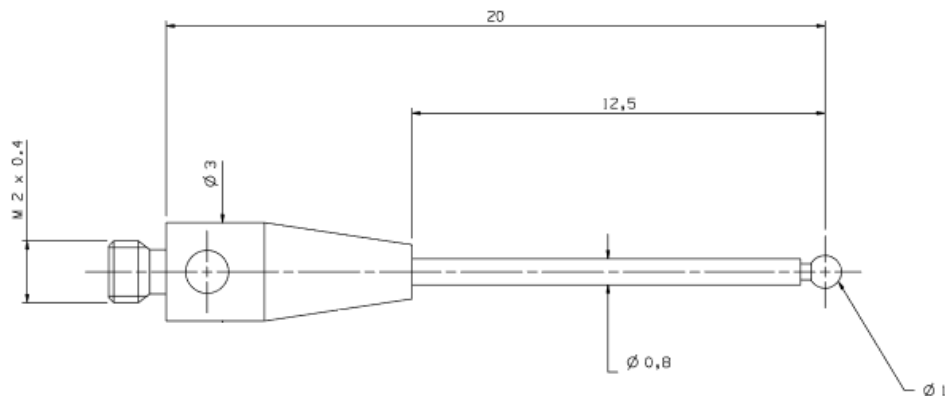


Joonis 2.12. Hexagoni HR-R mõõteotsikute vahetusrakis [15]

Tavaliselt kujutab mõõteotsikute vahetusrakis ennast pesade kogumit, mis on paigaldatud vertikaalsele statiivile. Statiiv on kinnitatud mõõtemasina lauale, mõõtetsooni tagumisele poolele lähemale, selleks et hoida vabana maksimaalne osa mõõtelaua pindalast. Mõõteotsikute vahetusrakise asukoht kalibreeritakse pärast mõõtemasina paigaldamist ning kalibreerimist korratakse, juhul kui vahetusrakise koht mõõtelaua muutub. Mõõteotsiku automaatne vahetus võimaldab parandada kordumist, võrreldes käsitsi vahetusega. Kasutades mõõteotsiku vahetusrakist, on automaatse mõõteotsiku vahetuse korral HR-R võrdne ± 0.5 mkm [11, 15].

2.7. Mõõteotsikud

Üheks põhiliseks mõõtmiselemendiks on mõõteotsik, mis avaldab vastastikumõju mõõtepeadele ja mõõdetavale objektile-detailile. Mõõteotsiku põhielementideks on ühilduv element (tavaliselt kasutatakse ühildamiseks meetrilist keeret), jaland (kärn), mõõteotsiku otsak (sfääriline, kettakujuline, nõelakujuline). Põhiliste geomeetriliste parameetrite näiteks sobib mõõteotsik D1L20 firmalt Renishaw. Joonisel 2.13 on esitatud D1L20 tehnilise joonise näidis [11, 14]:



Joonis 2.13. Renishaw D1L20 [14]

Joonisel 2.13 on kujutatud peamised parameetrid (mm):

1. M2x0.4 – meetriline keere mõõteotsiku ja mõõtepea ühendamiseks, kerme samm
2. 20 mm – mõõteotsiku pikkus
3. Ø 3 mm – ühenduskoonuse diameeter
4. 12.5 mm – tööpikkus (efektiivpikkus)
5. Ø 1 mm – otsaku diameeter.

Mõõteotsiku tootmiseks kasutatakse tavaliselt sünteetilist rubiini, terast, tsirkooniumi, räninetriidi [14].

Sünteetilisest rubiinist mõõteotsiku otsakud on kõige nõutavamad ning nad kuuluvad tihti komplekti, mida müüakse koos mõõtemasinaga. Need otsakud on kulumiskindlad, kõrge pigistustugevusega ning sileda pinnaga. Sünteetilisest rubiinist otsakute peamiseks puuduseks on see, et neid ei saa kasutada alumiiniumist ja malmist detailide skaneerimisrežiimis. Esimesel juhul on vaja tagada mõõteotsiku otsaku pinna puhtus pärast alumiiniumdetaili skaneerimist ning teisel juhul on see aktiivne kulum, mis toob esile vormi nihkumise ja suure mõõtevea [11, 14].

Terast kasutatakse tavaliselt kettakujulise mõõteotsiku otsakute tootmiseks, madala kõvaduse tõttu kasutatakse terase asemel tihti ka keraamikat või sünteetilist rubiini. Räninetriit sobib alumiiniumist detailide skaneerimiseks, kuid alumiiniumist detailide skaneerimisel omavad räninetriidist mõõteotsiku otsakud väga kõrget kulumit, mis piirab mõõtmisvõimalusi. Räninetriit on kõva ega tõmba ligi alumiiniumipuru [1, 11].

Tsirkooniumi kasutatakse malmist detailide mõõtmiseks ja skaneerimiseks. Kõvaduse ja kulumi näitajate poolest on tsirkoonium kõrvutatav rubiiniga [14]. Mõõteotsikute jalandite materjale toodetakse terasest, keraamikast, süsinikkiust või kõvadest sulamitest. Kõige laiemat kasutust on leidnud just terasest mõõteotsikute jalandid. Tavaliselt kasutatakse roostevabasid ja mittemagnetilisi terase marke. Terasest jalandite pikkus ei ületa tavaliselt 30 mm. Keraamikat kasutatakse siis, kui jalandi pikkus ületab 30 mm ning otsaku diameeter on suurem kui 3 mm. Mõõteotsiku kõvadus jääb samale tasemele tunduvalt madalama kaalu korral. Keraamikast jalandid on väga haprad ning nõuavad erikohtlemist mõõtmiste ajal. Süsinikkiust jalandid omavad otsakult kanduvate sumbvõnkumiste võimalust. Neid toodetakse rohkem kui 50 mm pikkusega mõõteotsikute jaoks [1, 11].

Õigesti valitud mõõteotsik annab võimaluse mõõta detaili kõrgeima täpsusega. Mõõteotsikute põhitüüpideks on:

1. **Sirged mõõteotsikud** – see tüüp sobib enamiku mõõteülesannete täitmiseks, automaatmõõtepeaga paaris lahendavad nad keerulisi ülesandeid. Seda kasutatakse ka keeruliste mõõteotsikute konfigureerimiseks. Sirgeid mõõteotsikuid on suures valikus erineva pikkuse ja diameetriga [14, 16].



Joonis 2.14. Sirge mõõteotsik sünteetilisest rubiinist otsakuga [16]

2. **Star-kujulised mõõteotsikud** moodustavad nelja või viie mõõteotsiku konfiguratsiooni. Mõõteotsiku hoidjal on keermeavad sirget tüüpi mõõteotsikute paigaldamiseks. See otsikutüüp vähendab oluliselt mõõtmisele kuluvat aega, sest puudub vajadus mõõtepea pööramiseks. Konfiguratsiooni iga mõõteotsik vajab kvalifitseerimist [14].



Joonis 2.15. Viiest mõõteotsikust koosnev *Star-kujuline* mõõteotsik [14]

3. **Kettakujulisi mõõteotsikuid** kasutatakse tavaliselt sisesoone laiuse mõõtmiseks teistele mõõteotsikutele kättesaamatutes kohtades. Kettakujulisel mõõteotsikul on kaks rullikut. Tavaline kettakujuline mõõteotsik võimaldab teha mõõtmisi ainult kahes suunas X- ja Y-telje kaudu, samal ajal kui rullikuga (rullikutega) kettakujuline mõõteotsik tuleb kvalifitseerida ka Z-telje järgi ning see võimaldab teha mõõtmisi selle telje kaudu [16].



Joonis 2.16. Kettakujuline mõõteotsik rullikuga [16]

4. **Hemisfääriga mõõteotsik** on keermega, mis on vajalik pikenduse ühendamiseks. Keraamiline hemisfäär võib olla diameetriga 16, 18, 22, või 30 mm. Need mõõteotsikud sobivad detaili sügavate elementide mõõtmiseks X-, Y- ja Z-telgedel. Hemisfääriga mõõteotsik võimaldab teha kontaktseid mõõtmisi ning mõõteotsiku ja detaili kontakti ajal tasalülitada ebatasase pinna mõju [16].



Joonis 2.17. Hemisfääriga mõõteotsik [16]

5. **Silindrilist mõõteotsikut** kasutatakse tavaliselt lehtmetailide ja peentoorikute mõõtmisteks või siis, kui pole võimalik varustada kindla kontakti rullikutega mõõteotsikute abil. Seda mõõteotsikutüüpi kasutatakse keermeavade keskkoha määramiseks. Silindrilisel mõõteotsikul on tavaliselt sfääriline otsak, mis võimaldab kasutada seda sirge mõõteotsiku otstarbel [14].



Joonis 2.18. Sfäärilise otsakuga silindriline mõõteotsik [14]

6. **Noolekujulised (nõelkujulised) mõõteotsikud** on mõeldud keermepindade mõõtmiseks skaneerimisrežiimis. Seda mõõteotsikut saab kasutada kõige pisemate avade asukohtade kontrollimiseks [14].



Joonis 2.19. Noolekujuline mõõteotsik [14]

Keeruliste pindade või detailide mõõtmiseks saab kasutada erilisi mõõteotsikute konfiguratsioone. Nende saamiseks kasutatakse lisaühendusi, adaptereid, pikendusi või hoidikuid *Star-kujuliste* mõõteotsikute jaoks [1, 11].

Mõõteotsikute pikendused võimaldavad ühendada mõõteotsikut mõõtepeaga, näiteks hemisfääriga mõõteotsiku ühendamiseks tuleb kasutada pikendust. Kindlasti tuleb meele pidada, et mõõteotsiku pikenduse kasutamine toob endaga kaasa kõvaduse kao, mis vähendab mõõtetäpsust. Pikendustega mõõteotsikute konfiguratsioonid võivad põhjustada väärarvutusi mõõteotsiku massi suurendamise tagajärjel [1, 11, 14].

Liigendühendused võimaldavad reguleerimist ühe või kahe telje suhtes, näiteks kui detaili tasasel pinnal on pinnaga mitte loodis olev ava ning pole võimalik korrektselt paigaldada mõõtepea nurka (mõõtepea nurga suure sammu tõttu). Sellise ülesande lahendamiseks sobib suurepäraselt liigendühendus [1, 11].

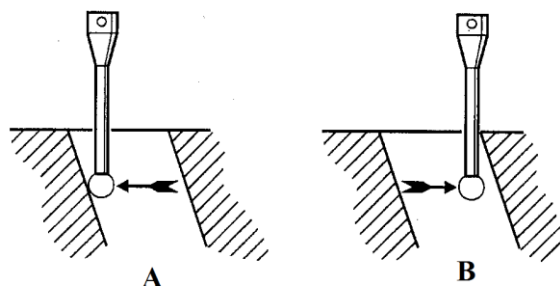


Joonis 2.20 Mõõtepea ja mõõteotsiku ühendamine liigendi abil [11]

2.7.1. Mõõteotsikute valik

Koordinaat-mõõtemasina tarkvara on programmeeritud mõõteotsiku otsaku gabariite kompenseerima. Kui detaili mõõtmise protsessis puudutatakse seda mitte mõõteotsiku otsakuga (mõõteotsiku sfääriga), vaid mõõteotsiku võlliga, on mõõteviga suur. Enne kui alustada programmi loomisega, tuleb õige mõõteotsikut valida. Mõõteotsik peab olema minimaalse vajaliku pikkusega. Mõõteotsiku pikkuse suurendamisega kasvab ka mõõteotsiku otsaku nihkumise väärtus, mis on vajalik puutetundliku mõõtepea

rakendamiseks. Mõõteotsiku pikkuse valiku kontrollimiseks võib võtta mõõteotsiku ning imiteerida mõõtemasina liikumist. Kui esineb vajadus kasutada pikki mõõteotsikuid, siis tuleb kindlasti jälgida, et mõõdetava pinna puude toimuks just mõõteotsiku otsakuga. Näidis on esitatud joonisel 2.21 [7, 11]:



Joonis 2.21. A – korrektne puude mõõteotsiku otsakuga, B – vale puude mõõteotsiku völliiga [11]

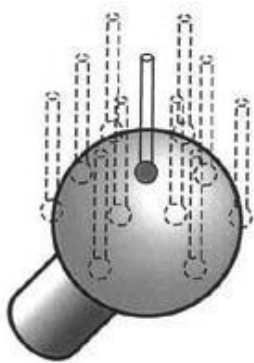
Vajalik on tagada minimaalne liidete arv mõõteotsiku konfiguratsioonis. Samuti tuleb kasutada kõige suurema diameetriga sfäärilist otsakut. Mõõteotsiku otsaku suurema diameetri korral suureneb vahemaa otsaku äärmuspunkti ja mõõteotsiku völli vahel, mis vähendab mõõteotsiku völliiga mõõdetava detaili pinna puute võimalust. Selle valiku üheks põhjuseks on ka mõõdetava pinna ebatasase väärtuse mõju vähendamine ebatasasuste tasalülitamise arvel. Mõõteotsiku konfiguratsiooni mass tuleb minimaliseerida. Võimalusel tuleb paigaldada samasuguse massiga mõõteotsikud (nagu *Star-kujuliste* mõõteotsikute konfiguratsioonides) või kasutada väikese tihedusega materjalidest mõõteotsikuid. Juhul kui mainitud tingimusi pole võimalik täita, tuleb kasutada suurendatud karedusega mõõtepead [5, 7, 11].

2.8. Mõõteotsiku kvalifitseerimine

Mõõteotsiku kvalifitseerimiseks nimetatakse protseduuri, mille käigus mõõteprotsess määrab mõõteotsiku otsaku raadiuse ning selle asendi nulli/koordinaat-mõõtemasina koduse positsiooni suhtes. Kõik mõõtmise teel saadud väärtused kantakse mõõtemasina andmetöötlusprotsessorisse. Mõõteotsik tuleb kvalifitseerida iga kord peale mõõtemasina sisselülitamist, iga kord peale mõõteotsiku vahetamist ning ka pärast ebaedukat kvalifitseerimist [2, 3, 10].

Mõõteotsiku kvalifitseerimist või mõõtepea mõõtevea rakendamise kontrollimist tehakse etalondetaili abil. Tavaliselt on see teatud diameetriga sfäär, mis oli toodetud erakordselt suure täpsusega. Kalibreerimissfääri täpsed mõõdud tuleb kanda kalibreerimisprogrammi. Sfäärilise kalibreerimissfääri hälve on tunduvalt väiksem koordinaat-mõõtemasina mõõteveast. Sellepärast vormiviga, mida kalkuleeritakse sfääri mõõtmisel, või mõõteotsiku otsaku vormi viga, mida kalkuleeritakse mõõteotsiku kvalifitseerimisel, peegeldab eelkõige mõõtemasina mõõteviga, mis ei sõltu mõõdetavast pikkusest [10, 14].

Mõõteotsikuid on kahte liiki: automaatse ja käsitsi kvalifitseerimisega. Automaatse kvalifitseerimise all mõeldakse seda, et kasutaja peab mõõtma vaid ühe punkti kalibreerimissfääri peal. Eelkõige tuleb võtta kalibreerimissfääri kõrgeim punkt ning viia mõõteotsik ülespoole turvalisele vahemaale. Pärast mõõtmise kinnitust teostub käsklus kalibreerimissfääri mõõtmiseks ning automaatselt teostub ülejäänud kvalifitseerimise osa. Käsirežiimis mõõteotsiku kvalifitseerimiseks nimetatakse protsessi, mida teostab otseselt mõõtemasina operaator. Kordamööda toimuvad mitmetel tasemetel kalibreerimissfääri kogu pinna puuted. Kui kasutaja planeerib mõõtmisi, kasutades ka mõõteotsiku küljeasendit, siis tarkvara annab teada, mis orientatsioonides võib kalibreerimissfääri mõõta. Kalibreerimissfääri peab puutuma ainult mõõteotsiku otsak [10, 14].



Joonis 2.22. Mõõteotsiku otsaku kvalifitseerimise puudete näide [10]

Tavaliselt tehakse mõõtmisi kolmel tasemel. Tasemed asuvad kalibreerimissfääri eri kõrgustel. Kvalifitseerimise jaoks tuleb mõõta vähemalt 25 punkti. Mõõteotsiku kvalifitseerimisel skaneerimisrežiimis mõõtmisteks valib mõõtmisprogramm automaatselt tasemete ja punktide arvu. Kalibreerimissfääri iga puute korral paneb programm kirja koordinaadid X, Y ja Z, kalkuleerides vahemaa sfääri arvestatava keskpunkti ja sfääripealse

kokkupuutepunkti vahel. Seda nimetatakse radiaalseks distantiks. Radiaalne distant arvutatakse valemi 2.2 järgi [10]:

$$\sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2} \quad (2.2)$$

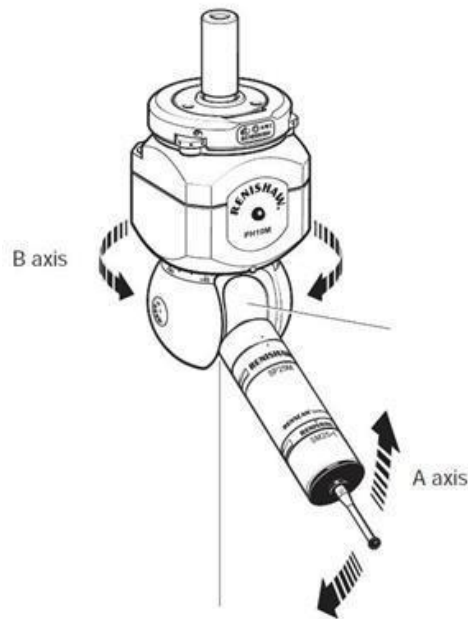
Programm arvutab radiaalse distant si iga 25.(kahekümne viienda) punkti jaoks, mis olid võetud kas automaatselt või käsitsi. Samuti toimub maksimaalse ja minimaalse radiaalse distant si otsing, lahutamise teel leitakse radiaalse distant si vahe valemi 2.3 järgi [10, 23]:

$$P_{FTU} = r_{max} - r_{min} \quad (2.3)$$

kus P – näitab, et mõõteviga on seotud sondeeritava süsteemiga;
 U – üksikmõõteotsiku kasutus;
 T – sondeeritav süsteem on kontaktne;
 F – kujundi viga.

P_{FTU} on mõõteotsiku vormiviga. Kvalifitseerimine loetakse edukaks, juhul kui saadud P_{FTU} väärtus on väiksem sellest, mille andis ette koordinaat-mõõtemasina tootja. Juhul kui P_{FTU} väärtus on tootja esitatud väärtusest suurem, on vaja selgitada välja põhjus, miks see võis juhtuda. Ebaeduka kvalifitseerimise võimalikeks põhjusteks on: mõõteotsik on halvasti mõõtepeaga ühendatud, mõõteotsiku otsak on kulunud või katkine, paigaldatud mõõteotsikul on jäänud diameeter valimata, puude ei toimunud mõõteotsiku otsakuga (käsitsi kvalifitseerimisel) [10, 23].

Vajalik on aru saada, et mõõtepea iga asendi muudatus vajab mõõteotsiku kvalifitseerimist. Mõõtepead võivad pöörelda ümber kahe telje A ja B. Nurgapöörde sammu annab ette tootja. Mõõtepea orientatsiooni saab näha Renishaw PH10M näitel [7]:



Joonis 2.23. Renishaw PH10M mõõtepea [14]

Joonisel 2.23 on kujutatud kahte mõõtepea orientatsiooni. Orientatsioon A on mõõtepea tõstmissuund. A0 nurga väärtus annab teada, et mõõtepea on suunatud mõõtelauale perpendikulaarselt. Joonisel 2.23 on mõõtepea orientatsioon A45, mis tähendab, et mõõtepea on tõstetud 45° vastavalt algusorientatsioonile A0. B orientatsioon on mõõtepea pöörlemine kinnitustelje ümber. Antud orientatsiooni A ja B nurgad on võimalik kombineerida selleks, et saavutada mõõtepea vajalikku asendit. Orientatsiooni kombinatsioone saab mõõtmiseks kasutada ja muuta nende asendeid mõõtmisprotsessis. Enne mõõtmist tuleb valida mõõtepea kõik asendid, mis on detaili mõõtmiseks vajalikud. Mõõteotsiku kvalifitseerimist teostatakse mõõtepea kõikides vajalikes asendites, selleks et mõõtmisprotsess oleks suure täpsusega. Antud tingimus on vajalik nii automaatsete mõõtepeade kui ka käsitsi pöörlevate mõõtepeade jaoks [7, 14].

3. MÕÕTEMASIN AXIOM TOO

3.1. Mõõtmisstrateegia

Mõõdetav detail kujutab endast alati kombinatsiooni standardsetest geomeetrilistest kujunditest nagu ringjoon, tasapind, joon, silinder, koonus, sfäär. Kõik geomeetrilised kujundid on moodustatud mõõtmisprotsessi ajal punktide abil, mis on koosnevad X-, Y- ja Z-koordinaatidest. Punktide mõõtmiseks on vaja mõõteotsiku otsaku ja mõõdetava detaili tasapinna puudet. Tabelis 3.1 on esitatud minimaalne vajalik punktide arv iga geomeetrilise elemendi mõõtmiseks [9].

Tabel 3.1. Vajalik mõõtepunktide arv igale geomeetrilistele elementidele [9]

Geomeetriline element	Matemaatiline miinimum (mõõtepunktide arv)	Soovituslik miinimum (mõõtepunktide arv)
Sirgjoon	2	5
Tasapind	3	9 (umbes kolm joont 3 mõõtepunktiga)
Ring	3	7 (kuni kuue ringisagara tuvastamiseks)
Sfäär	4	9 (umbes kolm ringi kolmes paralleelses tasapinnas)
Koonus	6	12 (ringid neljas paralleelses tasapinnas sirgsuse määramiseks) 15 (5 mõõtepunkti igale ringile ümaruse määramiseks)
Ellips	4	12
Silinder	5	12 (ringid neljas paralleelses tasapinnas sirgsuse määramiseks) 15 (5 mõõtepunkti igale ringile ümaruse määramiseks)
Kuup	6	18 (3 mõõtepunkti igale tasapinnale)

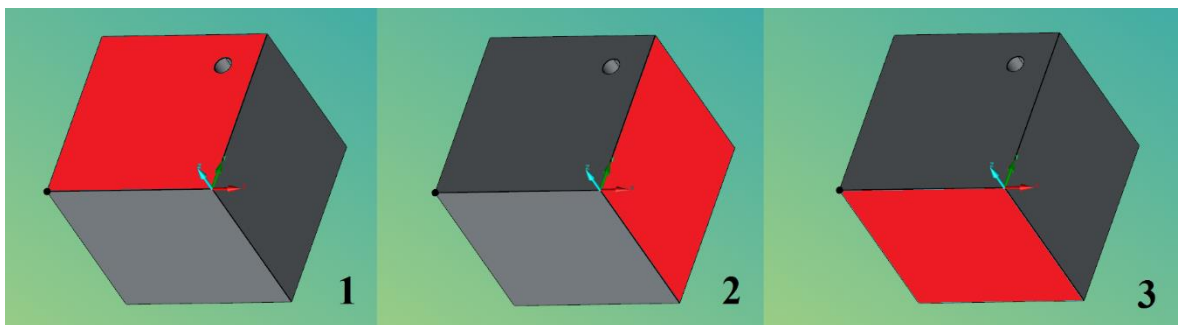
Geomeetriliste kujundite mõõtmiseks on loodud matemaatilised definitsioonid, mille järgi tuleb võtta määratud arv punkte, mis on vajalikud kindla geomeetrilise elemendi konstrueerimiseks. Näiteks tuleb ringjoone mõõtmiseks mõõta vähemalt kolm punkti. Sellisest punktide arvust piisab, et konstrueerida ringjoon ja leida selle diameetri. Kuid sellest ei piisa vormist hälbe tulemuse leidmiseks. Selleks et saavutada korrektsemat ja täpsemat tulemust, tuleb geomeetrilise kujundi konstrueerimiseks mõõta enam kui minimaalne arv punkte. Lähtudes otsese relatsioonist, tuleb pidada meeles, et mida rohkem punkte mõõdetakse, seda rohkem aega sellele kulutatakse, kuid seda täpsem on mõõtmistulemus.

3.2. Detaili positsioneerimine

Koordinaat-mõõtemasina suureks eeliseks on see, et pole otsest vajadust detaili täpseks paigaldamiseks koordinaattelgede suhtes. See on võimalik tänu detaili koordinaatsüsteemi ja mõõtemasina koordinaatsüsteemi seotusele, mis kujutab endast detaili matemaatilist positsioneerimist kolme telje (X , Y , Z) järgi [7, 9].

3.2.1. Mõõtetasapinnad

Töömõõtetasapinnad on üks kõige keerulisemaid mõõdetava detaili positsioneerimise osasid. Joonisel 3.1 on kujutatud kolm töötasapinda XY , YZ ja ZX , need on märgitud punase värviga. Antud tasapindades töötamine on vajalik detaili korrektseks positsioneerimiseks: mõõdetava objekti koordinaatsüsteemi pöörlemine, nihkumine ja joondamine. Koordinaatsüsteemi pöörlemiseks on vaja valida töötasapind.



Joonis 3.1. Mõõtetasapinnad

Iga töötasapinna jaoks on olemas telg, mille ümber toimub koordinaatsüsteemi pöörlemine: töötasapinna XY jaoks (joonisel 3.1 punasega märgitud tasapind nr 1) on selleks Z -telg. Tasapinna YZ jaoks (joonisel 3.1 punasega märgitud tasapind nr 2) on selleks X -telg. Tasapinna ZX jaoks (joonisel 3.1 punasega märgitud tasapind nr 3) on selleks Y -telg.

Kõigis koordinaat-mõõtemasinate tarkvarades kasutatakse vektorite suundade väärtusi, kus I on pööre X -teljelt, J on pööre Y -teljelt ning K on pööre Z -teljelt. Käsitsi mõõtmisel on mõnikord vaja vektorite väärtusi valida, lähtudes sellest, mis töötasapinnal saab mõõtmine toimuma. Näiteks kui on vajalik mõõta punkti töötasapinnas XY ja mõõtepea orientatsioon on $A0B0$, siis on vaja iseseisvalt korrektselt valida mõõtevektori suund või kontrollida selle määramist mõõtemasina tarkvara poolt. Antud tingimuste vektorisuunaks on $I0$, $J0$, $K1$.

Joonisel 3.1 on kujundatud kolm töötasapinda ning tabelis 3.2 on antud vektorite väärtused kuue töötasapinna jaoks [7]:

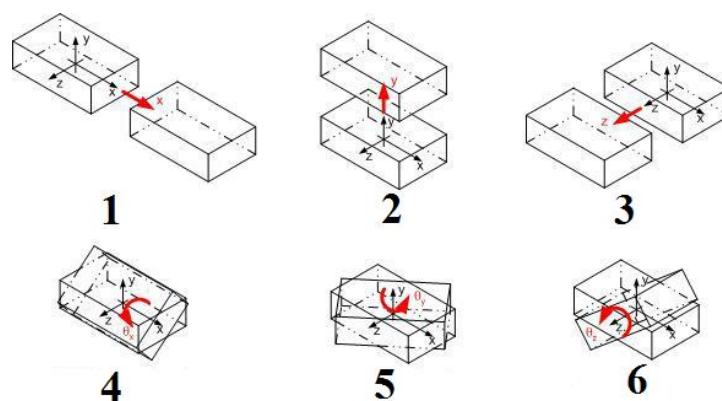
Tabel 3.2. Vektorite väärtused põhiliste tööpindade jaoks [7]

Töötasapind	I	J	K
XY (ülemine)	0	0	1
XY (alumine)	0	0	-1
YZ (parem)	1	0	0
YZ (vasak)	-1	0	0
ZX (esikülg)	0	1	0
ZX (tagakülg)	0	-1	0

3.3. X-, Y- ja Z-telje joondamine

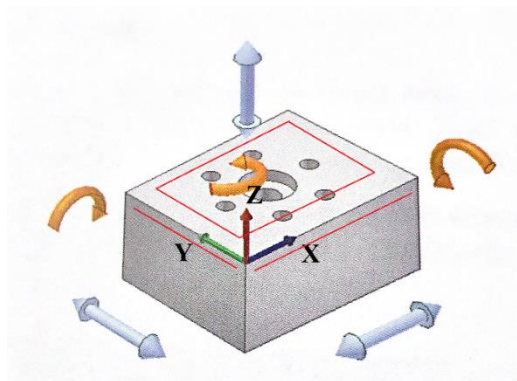
Matemaatilisel baseerimisel teostatakse mõõdetava detaili tegeliku asukoha ühitamist koordinaat-mõõtemasina mõõdetavas ruumis, kasutades nii CAD-mudelit kui ka ilma selleta. Detaili baseerimisprotsess mõõtelaua muudab detailide positsioneerimise lihtsaks. Pole vaja positsioneerida detaili mõõtelaua paralleelselt telgedega X, Y, Z, kuid pärast positsioneerimist peab detail olema hästi kinnitatud. Detaili baseerimisest arusaamine on põhiline kontseptsioon, mis võimaldab joondamise funktsioone kasutada [12, 13].

Esmane joondamine on mõõdetava objekti Z-telje baseerimine, määratakse Z-telje nullkoordinaat. Mõõdetava objekti asukoht töötasapinnas XY annab võimaluse pöörata mõõdetavat detaili koordinaatsüsteemi Z-telje ümber. Sekundaarseks joondamiseks on X- ja Y-telgede baseerimine mõõtelaua. Pärast täisjoondamist fikseeritakse mõõdetava objekti asend ja orientatsioon kõigi vabadusastete järgi [12].



Joonis 3.2. Kuus vabadusastet [7]

Joonisel 3.2 on kujutatud kõik kuus vabadusastet mõõdetava objekti baseerimiseks. Punased nooled näitavad mõõdetud objekti liikumissuundi koordinaatsüsteemis. X-, Y- ja Z-telgede lineaarliikumise suunad on kujutatud vastavalt numbritega 1, 2, 3. X-, Y- ja Z-telgede ümber pöörlemise võimalused on kujutatud numbritega 4, 5, 6. Kõigi kuue mõõdetava objekti vabadusaste määramiseks on vaja kindlaks defineerida objekti asend ning orientatsioon. Vabadusaste määramiseks on mitu võimalust, üks nendest on geomeetriliste elementide järgi asukoha defineerimine. See vabadusaste määramise variant näeb ette vähemalt kolme geomeetrilise elemendi mõõtmist, tingimusel et mõõdetav objekt omab vajalikku töötasapindade arvu kuue vabadusaste defineerimiseks [7, 9, 12].

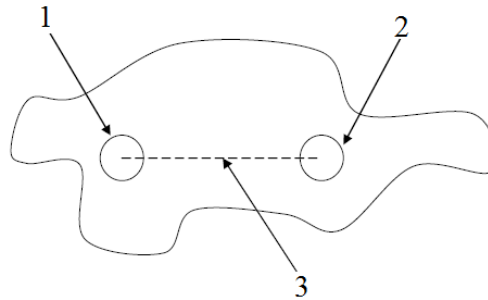


Joonis 3.3. Koordinaatsüsteemi defineerimine geomeetriliste elementide järgi [7]

Esimeseks mõõteelemendiks on tasapinna mõõtmine XY-töötasapinnal. Kui kasutaja mõõdab tasapinda, tuvastab koordinaat-mõõtemasin töötasapinna automaatselt. Tasapinna mõõtmine töötasapinnal XY määrab korraga kolm vabadusastet: pöörlemine X- ja Y-telje ümber ning Z-telje nulli nihkumine. Järgmine samm on joone mõõtmine. Töötasapinnal YZ mõõdetakse joont. Mõõdetud joon annab võimalust määrata veel üks vabadusaste: X-telje nulli nihkumine. Kolmandaks geomeetriliseks elemendiks on joon, kuid juba ZX töötasapinnal. Teine joon mõõdetakse vähemalt kolme mõõtepunktiga ning määratakse kaks ülejäänud vabadusastet: Y-telje nulli nihkumine ja pöörlemine Z-telje ümber. Sel juhul on mõõdetava objekti koordinaatsüsteem konstrueeritud vasakus nurgas. Viimane mõõdetud geomeetiline element on prioriteetne vabadusaste jaoks [9, 12].

Juhul kui on vaja mõõdetud objekti koordinaatsüsteem joondada näiteks vasaku serva järgi, siis viimane mõõdetud geomeetiline element YZ-töötasapinnal peab olema joon.

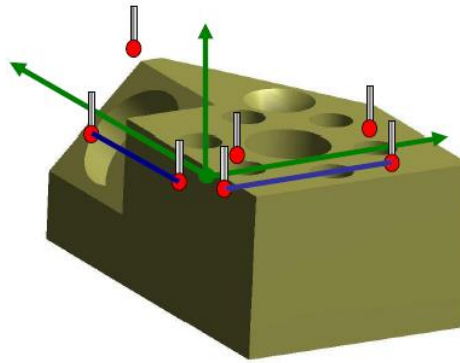
Koordinaatsüsteemi pöörlemiseks on vaja alati jooni või tasapindu mõõta, kui telje nullpunkti nihkumiseks kasutatakse mõõtepunkte. Baseerimine geomeetriliste elementide järgi sõltub detailist. Joonisel 3.4 on kujutatud detaili, millel pole vajalikke sirgeid töötasapindu koordinaatsüsteemi loomiseks [9, 12].



Joonis 3.4. Detail ilma sirgete töötasapindadeta koordinaatsüsteemi loomiseks [22]

Seejärel kasutatakse telgede pööramiseks ja nullpunkti nihutamiseks ringjoont (joonisel 3.4 määratud numbriga 1). Pärast on vaja mõõta veel üht ringjoont, mis on kujutatud joonisel 3.4 numbriga 2. Kasutades ringjoone keskpunkti number 1 ja ringjoone keskpunkti number 2, konstrueeritakse joon, mille abil pööratakse ja nihutakse mõõdetava detaili koordinaatsüsteemi. Detaili koordinaatsüsteem ehitakse üles vastavalt toote joonises olevatele nõuetele. Juhul kui joonisel pole baaspinnad ja koordinaatsüsteem märgitud, siis analüüsitakse mitmeid erinevaid võimalusi ja parameetreid (vajalik on geomeetriliste elementide olemasolu, detaili suurus, detaili töötlus ja paigaldus trei-, freespingis) [7, 8].

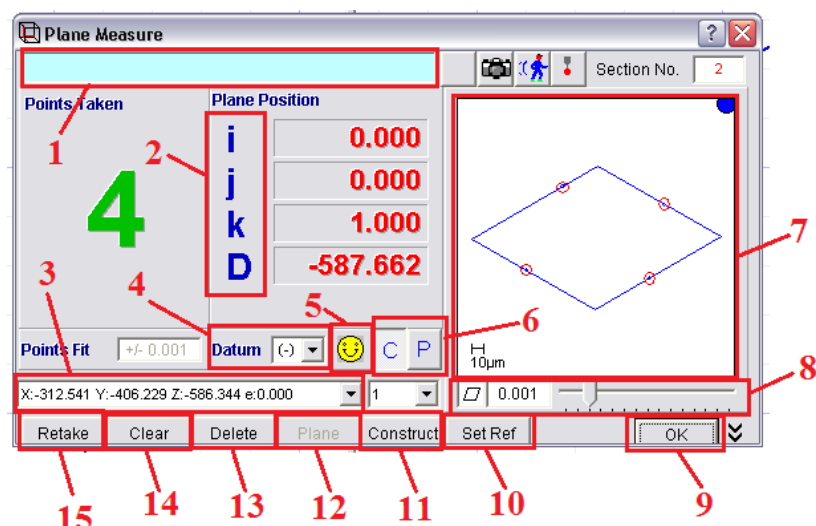
Koordinaatsüsteemi peamine baseerimisvarinat on 3-2-2. Koordinaatsüsteem ehitatakse läbi kahe mõõdetud joone ristpunkti.



Joonis 3.5. Baseerimine 3-2-2 [22]

Esiteks on vaja mõõta pind töötasapinnal XY ja kasutada nelja punkti tasapinna mõõtmiseks. Set Ref nuppu vajutades tekib vajalik joondus Z-telje suhtes. Järgmise manipuleerimise jaoks tuleb mõõta joon Y-teljel (kasutada 3 punkti mõõtmiseks). Pärast Set Ref nupu vajutamist määratakse, et mõõdetud detaili koordinaatsüsteemi Y-telg on paralleelne mõõdetud joonega. Viimase sammuna mõõdetakse kolme punkti abil joon X-teljel. Selle järel vajutatakse Set Ref nuppu, tarkvara ristab automaatselt Y- ja X-telje jooned ning konstrueerib joonte ristumiskohas selle punkti. Nüüd saab konstrueeritud punkt olla detaili koordinaatsüsteemi nullpunktiks Y- ja X-telje suhtes [6, 7, 22].

3.3.1. Tarkvara mõõtmisakna nupud



Joonis 3.6. Mõõtmisakna nuppude seletus [22]

- 1) Helesinisele alale saab sisestada geomeetrilise komponendi nime.
- 2) X-, Y- ja Z-koordinaatide väärtused või i, j, k vektori väärtused.

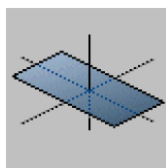
- 3) Iga mõõdetud punkti X-, Y- ja Z- mõõtemasina koordinaatsüsteemis.
- 4) Baaselementide tähis.
- 5) „Naerataba näo“ funktsioon. Sellel funktsioonil on kaks sõnumit. Juhul kui nägu naeratab, tähendab see, et viimane mõõdetud punkt vastab mõõdetud objekti kujule ega ületa läheväärtust. Kui viimane mõõdetud punkt ületab läheväärtust, antakse helisignaali ja nägu muutub õnnetuks.
- 6) Koordinaatsüsteemide ümberlülitus. C – Cartesiuse koordinaatsüsteem, P – polaarkoordinaatsüsteem.
- 7) Mõõdetava objekti graafiline kujutis.
- 8) Mastaabi reguleerimisskaala mõõdetava objekti graafilise kujutise jaoks.
- 9) Kinnituspupp, mõõtmise lõpp.
- 10) Koordinaatsüsteemi joondamise pupp mõõdetava objekti jaoks.
- 11) Geomeetrilise elemendi konstrueerimispupp.
- 12) Geomeetrilise elemendi tasapinna sundvalik ning geomeetrilise elemendi konstrueerimine kindlale tasapinnale.
- 13) Geomeetrilise elemendi kustutamine.
- 14) Mõõtepunktide kustutamine, selleks et alustada objekti mõõtmist algusest.
- 15) Viimase mõõtepunkti kustutamine.

3.4. Geomeetria komponendid

Selles peatükis käsitletakse geomeetrilisi elemente, mida saab mõõta koordinaatmõõtemasinaga Axiom Too. Kõik puuteandurid töötavad mõõteotsiku mõõdetava pinnaga mehaanilise kontakti printsiibil. Iga geomeetrilise elemendi mõõtmine peaks toimuma suure mõõtepunktide arvuga. Tähtis on õigesti valida mõõteotsiku korrektne suurus ning pikkus.

3.4.1. Tasapind

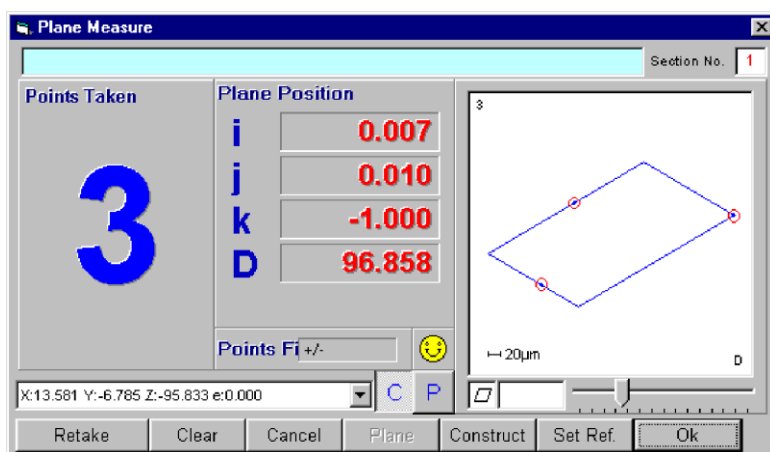
Tasapinna mõõtmiseks tuleb vajutada nuppu Plane:



Joonis 3.7. Tasapinna mõõtmise nupp Plane [22]

Võimalikult suure täpsusega tasapinna mõõtmiseks tuleb mõõdetav tasapind jagada visuaalselt mitmeks sektoriks. Sektorite arv sõltub sellest, mitme punktiga on plaanis tasapinda mõõta. Mõõtepunkti asukoht ühes sektoris ei tohiks kokku langeda punkti asukohaga teises sektoris [9].

Tasapinna mõõtmiseks tuleb mõõta vajalikul pinnal mitu punkti. Pärast kolme punkti mõõtmist koordinaatide matemaatiliste arvutuste abil on tasapind konstrueeritud.

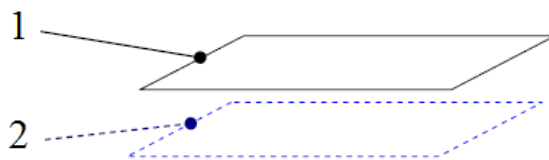


Joonis 3.8. Tasapinna põhiaken [22]

I, j ja k väärtused on tasapinna suunavektorid. Koordinaatsüsteemi alguspunkti ja tasapinna vaheline kaugus määratakse tähega D. Tasapinnalisuse väärtuse saamiseks mõõdetakse vähemalt 4 punkti tasapinnal. Põhiaknas, tasapinnalisuse märgi kõrval ilmub tulemus. Viimase mõõdetud punkti uuesti mõõtmiseks tuleb vajutada nuppu Retake, siis kustub viimane mõõdetud punkt ja tema koordinaadid ära. Nupu Clear vajutamisel kustutatakse kõik mõõdetud punktid. Liigutatava kursoriga, mis asub tasapinnalisuse märgi kõrval, saab mõõdetud punktide graafilist mastaapi reguleerida [12, 19].

Teistest geomeetrilistest elementidest tasapinna konstrueerimiseks tuleb vajutada nuppu Plane. Avatud tasapinna põhiaknas valitakse funktsioon Construct. Pärast nupu Construct vajutamist minimeerib tasapinna põhiaken. Nüüd on vaja valida geomeetrilised elemendid, millest konstrueeritakse tasapind. Näiteks joon annab vähemalt kaks punkti tasapinna konstrueerimiseks, sõltudes mõõdetud punktide arvust. Ringjoon ja sfäär annavad tasapinna konstrueerimiseks ühe punkti. Kui kõik vajalikud geomeetrilised elemendid on valitud, siis kinnitatakse konstrueerimine OK nupuga.

Sobiva kauguse tasapinna konstrueerimiseks tuleb valida mõõdetud nominaaltasapind. Pärast tasapinna valimist sisestatakse soovitud kauguse väärtust ja kinnitatakse see.

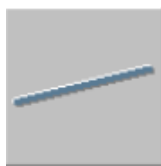


Joonis 3.9. Tasapinna konstrueerimine [22]

kus 1 – nominaaltasapind, 2 – sobiva kauguse konstrueeritud tasapind.

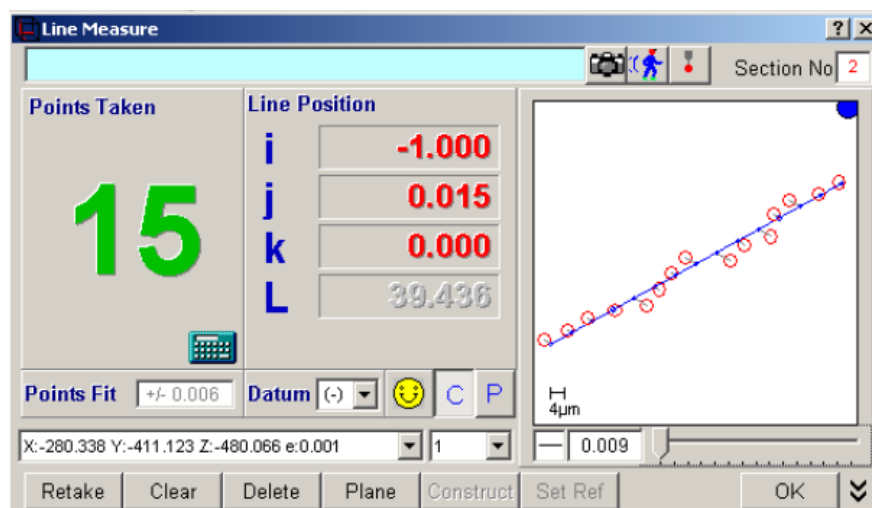
3.4.2. Joon

Joone mõõtmiseks tuleb vajutada nuppu Line.



Joonis 3.10. Joone mõõtmise nupp Line [22]

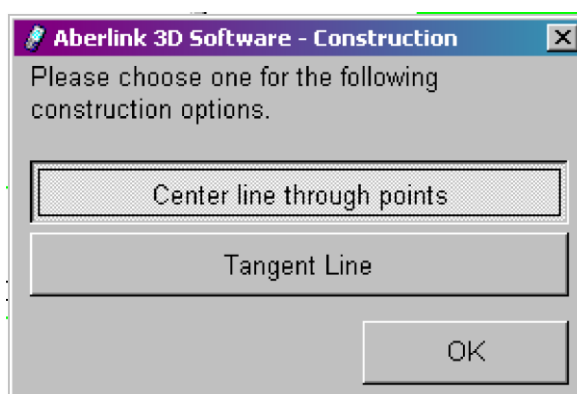
Joone mõõtmiseks vajutatakse nuppu Line ja mõõdetakse vähemalt kaks mõõtepunkti. Matemaatilise modelleerimise abil ilmub joone graafilise osa põhiaknas joone pilt mõõdetud punktidest. I, J, K väärtused on joone suunavektor. L väärtus on mõõdetud joone pikkus. Töötasapind määratakse automaatselt [13, 19].



Joonis 3.11. Joone mõõtmise põhiaken [22]

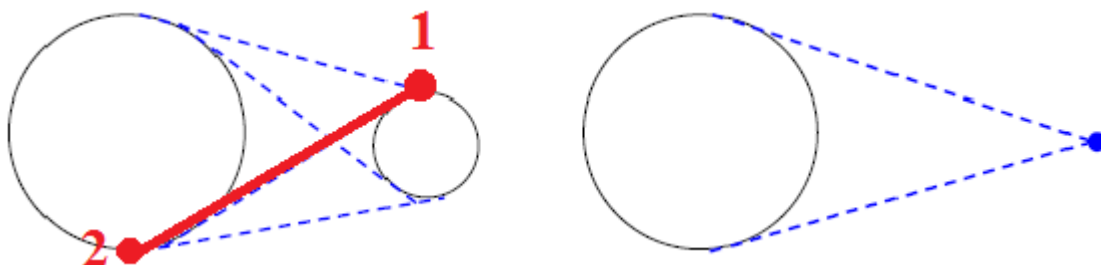
Kõiki mõõdetavaid jooni pikendatakse automaatselt hetkeni, kus nad ristuvad ühe mõõdetud geomeetrilise objektiga või kui seadetes on määratud pikenduse maksimaalne väärtus. Halli värvi L-i väärtus tähendab seda, et pole olemas joone pikkuse väärtust, vaid on olemas ainult äärmiste mõõdetud punktide vaheline kaugus. Joone pikkus on edukalt mõõdetud siis, kui L-i väärtus on punast värvi ja joon on mõlemalt poolt pikendatud. Sirgsuse väärtuse saavutamiseks tuleb mõõta joont vähemalt kolme punktiga. Sirgsuse väärtus kuvatakse automaatselt [19, 22].

Joonte konstrueerimiseks on vaja vähemalt kahte mõõdetud või konstrueeritud punkti. Joont on võimalik konstrueerida läbi mõõdetud punktide, ringjoonte (läbi ringjoonte konstrueeritud keskpunktide) või sfääride (läbi sfääride konstrueeritud keskpunktide). Joone konstrueerimiseks tuleb vajutada põhiaknas nuppu Construct. Nüüd on võimalik valida sobivad parameetrid joone konstrueerimiseks:



Joonis 3.12. Joone konstrueerimise parameetrid [22]

- Punkte läbiv keskjoon on joon, mis läheb ringide või sfääride keskpunktidest läbi. Pärast selle parameetri valimist on vaja valida geomeetrilised elemendid, millest hakkab joon koosnema.
- Joone puutuja – joon konstrueeritakse kahe ringi vahele või ringjoone ja punkti vahele.



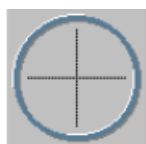
Joonis 3.13. Joone puutuja konstrueerimine

Joonisel 3.13 on sinise punktiirjoonega toodud kõik võimalused joone puutujate konstrueerimiseks, kuid ühe puutuja konstrueerimiseks tuleb valida vajalik positsioon esimeses ringis (joonisel 3.13 tähistatud numbriga 1) ning vajalik positsioon teises ringis (joonisel 3.13 tähistatud numbriga 2), siis saab vajaliku puutujajoone konstrueerida (punane joon joonisel 3.13) [19, 22].

Alati on võimalik konstrueerida joont mittepalleelsete tasapindade vahel, selle jaoks tuleb vajutada Construct joonte põhiaknas ja valida kaks mittepalleelset tasapinda. Keskjoone saab konstrueerida kahe mõõdetava joone vahele samuti nagu tasapinna puhul.

3.4.3. Ringjoon

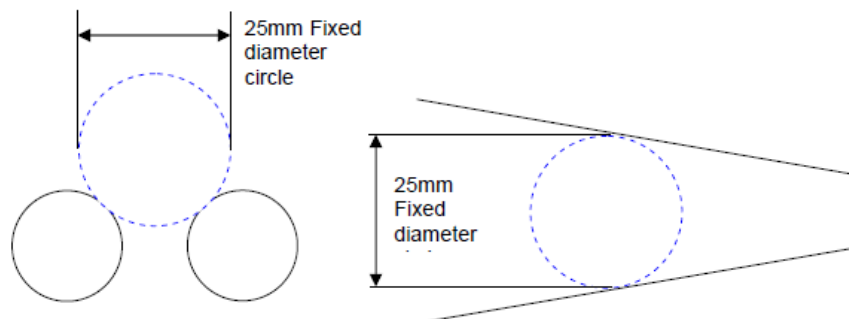
Ringjoone mõõtmiseks tuleb vajutada nuppu Circle.



Joonis 3.14. Ringjoone mõõtmise nupp Circle [22]

Ringjoone funktsiooni abil saab mõõtemasina kasutaja mõõta nii täisringi kui ka ringi osa. Kui kasutaja mõõdab ringi ja mõõtepunktid ulatuvad vähem kui 180° ringist, kuvatakse ringjoone põhiaknas kaar esimese ja viimase mõõdetud punkti vahel.

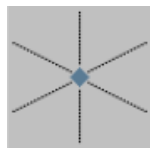
Samuti on võimalik konstrueerida ringjoont kahe mõõdetud geomeetrilise komponendi vahele, juhul kui on võimalik need virtuaalselt ristata. Iga konstrueerimise kohta kuvatakse alati vihje konstrueerimisest [19, 22].



Joonis 3.17. Fikseeritud ringjoone diameetri konstrueerimine [22]

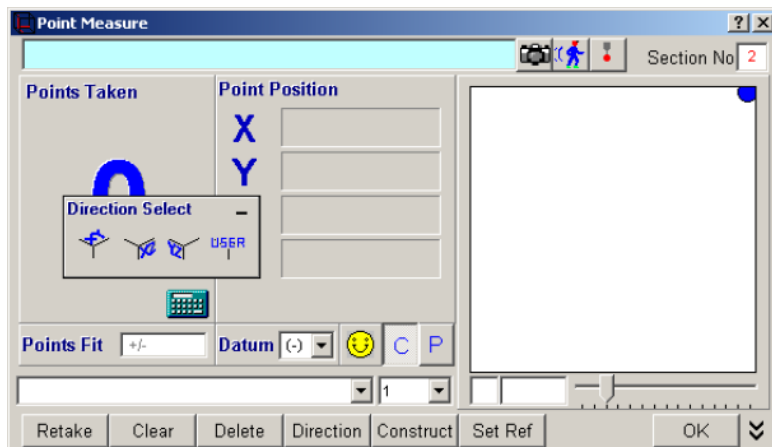
3.4.4. Punkt

Punkti mõõtmiseks tuleb vajutada nuppu Point.



Joonis 3.18. Punkti mõõtmise nupp Point [22]

Punkti õigeaks mõõtmiseks on kõigepealt vaja valida õige töötasapind (kui töötasapind oli automaatselt valesti määratud või ilmub hoiatusaken töötasapinna valimise palvega), millel hakkab punkti mõõtmine toimuma.



Joonis 3.19. Punkti mõõtmise põhiaken [22]

Punkti mõõtmise põhiaknas tuleb vajutada nuppu Direction ja seejärel valida õige töötasapind, lähtudes mõõdetava objekti koordinaatsüsteemist. Kui mõõdetava objekti koordinaatsüsteem on identne Axiom Too koordinaatsüsteemiga, siis:

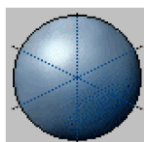
- Z-telje punkti mõõtmiseks tuleb valida XY töötasapind
- X-telje punkti mõõtmiseks tuleb valida YZ töötasapind
- Y-telje punkti mõõtmiseks tuleb valida XZ töötasapind.

Muudel juhtudel on vaja valida töötasapind USER. Seejärel ilmub töötasapinnale kompenseerimisvihje, mis vajab kinnitamist. Pärast õige töötasapinna valimist ja punkti mõõtmist rakendatakse mõõteotsiku õiget raadiust. Õigesti mõõdetud punkt asub mõõdetava objekti tasapinnal, valesti mõõdetud punkt asub mõõdetava objekti tasapinna sees.

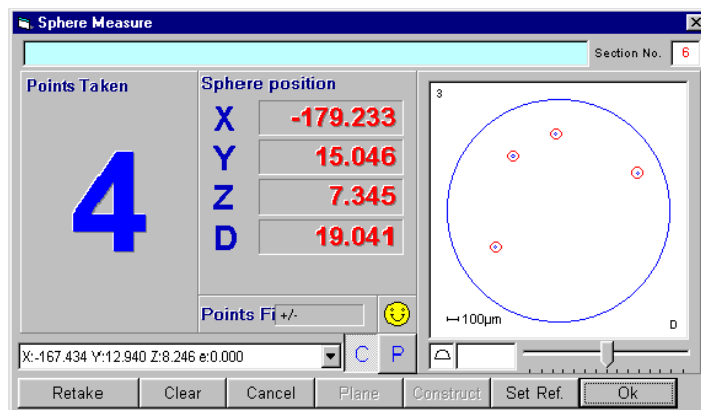
Mõõtepunkti on võimalik konstrueerida mõõdetud geomeetriliste komponentide ristumisega, mõõdetud geomeetriliste komponentide keskpunkti. Mõõtepunkti konstrueerimine toimub siis, kui on valitud Construct funktsioon Aberlinki 3D-tarkvaras.

3.4.5. Sfäär

Sfääri mõõtmiseks tuleb vajutada nuppu Sphere.



Joonis 3.20. Sfääri mõõtmise nupp Sphere [22]



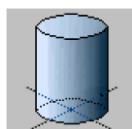
Joonis 3.21. Sfääri mõõtmise põhiaken [22]

Sfääri mõõtmiseks on vaja mõõta sfääri übermõõt, minimaalselt 3 mõõtepunkti ja kõrgeim mõõtepunkt sfääri peal. Kuna sfäär on kolmedimensiooniline geomeetiline element, pole vaja töötasapinda valida [9].

Sfääri pinnaprofiili väärtuse saamiseks on vaja mõõta veel üks mõõtepunkt sfääri peal. Kindlasti tuleb mõista seaduspära, et mida rohkem mõõtepunkte mõõdetakse, seda täpsem mõõtetulemus saadakse. Pärast sfääri mõõtmist on võimalik määrata mõõdetud sfääri koordinaatsüsteemi nullpunkti, vajutades nuppu Set Ref, mispeale X-, Y- ja Z-koordinaadid võrdsustuvad nulliga [9, 22].

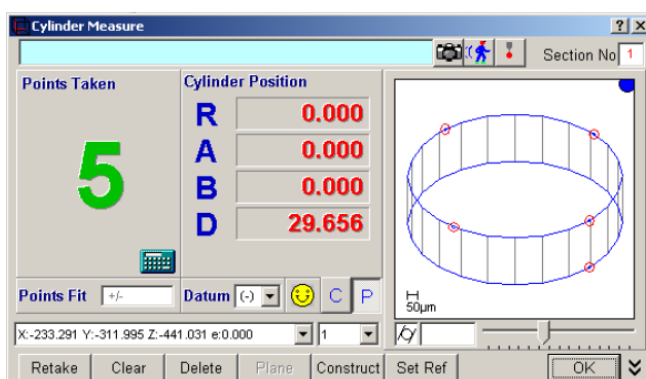
3.4.6. Silinder

Silindri mõõtmiseks tuleb vajutada nuppu Cylinder.



Joonis 3.22. Silindri mõõtmise nupp Cylinder [22]

Silindri mõõtmiseks on vaja mõõta vähemalt viis mõõtepunkti. Sisesilindri või välissilindri määramiseks analüüsib tarkvara mõõtepunktide suunda. Pärast viie punkti mõõtmist silindri põhiaknas ilmub silindri skemaatiline kujutis.



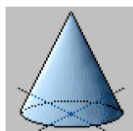
Joonis 3.23. Silindri mõõtmise põhiaken [22]

Silindrilisuse väärtuse saamiseks on vaja mõõta veel üks mõõtepunkt silindri sees. Kõige täpsema tulemuse saamiseks peavad mõõdetud punktid katma võimalikult suurt silindri

pinda. Kui mõõteobjekti koordinaatsüsteem pole veel konstrueeritud, määratakse silindri nurk koordinaat-mõõtemasina telgede suhtes [22].

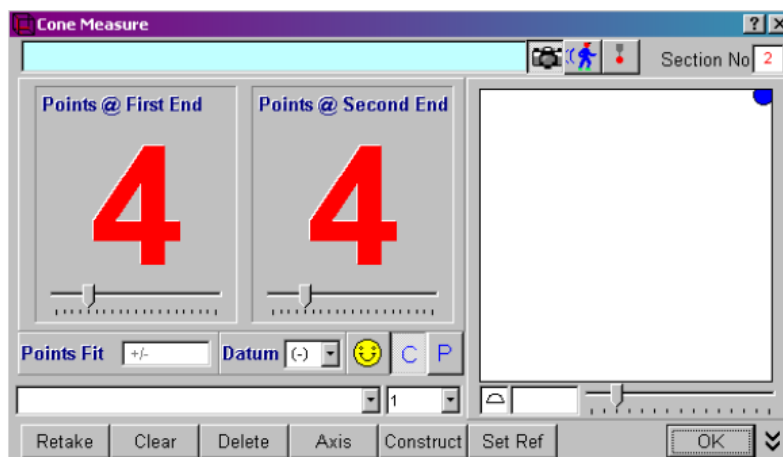
3.4.7. Koonus

Koonuse mõõtmiseks tuleb vajutada nuppu Cone.



Joonis 3.24. Koonuse mõõtmise nupp Cone [22]

Juhul kui koonuse telg pole võimalik määrata, on koonuse mõõtmiseks vaja mõõta vähemalt neli mõõtepunkti, mis moodustavad koonuse übermõõdu ülemises otsas, ja vähemalt neli mõõtepunkti, mis moodustavad koonuse übermõõdu alumises otsas. Juhul kui on võimalik määrata koonuse telg, tuleb mõõta vähemalt kuus mõõtepunkti suvalises järjekorras [22].



Joonis 3.25. Koonuse mõõtmise põhiaken (mõõtmine kahe übermõõduga) [22]

Koonuse põhiaknas on nüüd kaks mõõtepunkti loendurit. Väga oluline on mõõta koonuse übermõõddud samal sügavusel, selleks on võimalik blokeerida koordinaat-mõõtemasina telje liikumine. Vahemaa esimese ja teise übermõõdu vahel peab olema maksimaalne. Nüüd väheneb loenduri näidu punktide arv ühe mõõtepunkti võrra koonuse mõõtmise ajal. Kui esimene loendur näitab nulli, on vaja mõõta koonuse teine ots. Siis mõõdetakse punktid

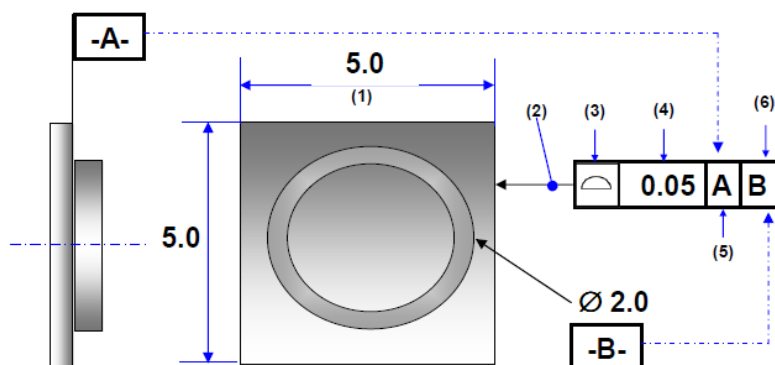
koonuse teises otsas, kuni loendur hakkab nulli näitama. Tulemuseks on koonuse koordinaatide informatsioon X-, Y- ja Z-telje kohta ning A – koonuse nurga kohta [22].

Konkreetsel pinnal koonuse maksimaalse übermõõdu (näiteks augu faasi) mõõtmiseks on vaja konstrueerida läbimõõt. Faasi läbimõõdu konstrueerimiseks on vaja mõõdetud koonus tasapinnaga ristata.

Selleks et leida koonuse läbimõõdu asukoht, tuleb uut läbimõõtu antud parameetriga konstrueerida. Valitakse mõõdetud koonus ja ilmuvasse aknasse sisestatakse soovitud läbimõõt ja kinnitatakse väärtus.

4. ASENDITOLERANTSIDE MÕÕTMINE

Geomeetriliste mõõtmete ja tolerantside määramiseks kasutakse universaalset sümbolikeelt. Sümbolid võimaldavad loogiliselt ja täpselt kirjeldada detaili omadusi. Joonisel 4.1 asuvad sümbolid raamis ning neid loetakse vasakult paremale [18].



Joonis 4.1. Geomeetriliste mõõtmete ja tolerantside märgistamine [22]

Joonisel 4.1 on kujutatud detail ning geomeetriliste mõõtmete ja tolerantside sümbolid, kus number 1 on detaili suurus millimeetrites (üks ruudu külge on 5 mm), 2 on nool, mis tähistab, mis pinnale kuulub tolerants, 3 – geomeetriliste mõõtmete ja tolerantside sümbol (pinnaprofiili sümbol), 4 – lubatud hälve 0,05 mm, 5 ja 6 – baaspinnad, mille suhtes on antud pinnaprofiili tolereeritav suurus [17, 18].

Geomeetrilised tolerantsid ilmuvad mõõtmisekraanile kohe peale mõõtmist, juhul kui mõõtepunktide minimaalsest arvust on mõõdetud rohkem kas või ühe punkti võrra. Kõigi mõõdetud geomeetriliste tolerantside väärtuste vaatamiseks on vaja vajutada nuppu Geometric Tolerance. Geomeetriliste tolerantside väärtused kuvatakse mõõdetud geomeetriliste elementide kõrval. Mõõdetud geomeetrilised elemendid tuleb valida käsitsi [13, 22].



Joonis 4.2. Nupp Geometric Tolerance [22]

Geomeetriliste tolerantside väärtuste saamiseks tuleb valida sobiv mõõdetud geomeetriline element: sirgsuse jaoks – mõõdetud joon, tasapinnalisuse jaoks – mõõdetud tasapind,

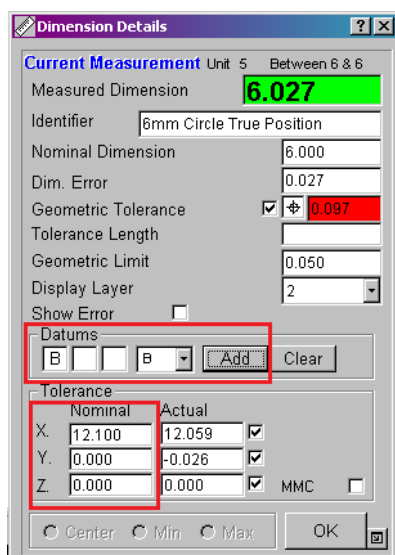
ümaruse jaoks – mõõdetud ring, silindrilisuse jaoks – mõõdetud silinder. Rööpsuse tolerants määratakse baasipinna või telje suhtes kahe mõõdetud paralleelse pinna või kahe mõõdetud paralleelse joone abil [12, 22].

Ristsuse geomeetiline tolerants määratakse kahe mõõdetud pinna või kahe mõõdetud joone abil. Tasapinnad ja jooned peavad olema perpendikulaarsed ligistikku, baasipinna või telje suhtes.

4.1. Koht

Positsiooni tolerants on geomeetrilise elemendi lubatud positsiooni hälve tema mõõdetud täpse asukoha suhtes. Kõige sagedamini määratakse joonisel baasgeomeetrilised elemendid ja tähistatakse mõne tähega. Geomeetrilise baaselemendi valimiseks tuleb vajutada parema hiireklahviga sellele elemendile. Valitud elemendi kõrvale ilmub mõõteaken, kus tuleb vajutada Datum. Baaselement on valitud ja tähistatud [22].

Kui ülesandeks on geomeetrilise elemendi tõelise asukoha leidmine ühe või mitme baaselemendi suhtes, mitte detaili konstrueeritud koordinaatsüsteemi suhtes, saab aknas Dimension Details valida õige baaselemendi.



Joonis 4.3. Põhiaken Dimension Details [22]

Nupuga Add saab õige baaselemendi lisada. Pärast kõigi baaselementide valimist (maksimaalne baaselementide arv on 3) muutuvad X-, Y- ning Z-telje koordinaatide nominaalväärtused valitud baaselementide suhtes.

5. MÕÕTMISE TULEMUSED

Pärast iga mõõtmist tuleb mõõtmistulemus eraldi raportina. Mõõtetulemuste kättesaamiseks on mitu võimalust. Kiire mõõtmise puhul, kus tulemust ei analüüsita ega salvestata, saab mõõtetulemuse kohe ekraanile kuvada. Juhul kui on vajadus või konkreetne tööülesanne, mille käigus on vaja koostada mõõtmistulemuste raport järgneva analüüsi ja võrdluse jaoks, on võimalik teha eraldi fail koos mõõtetulemustega ja salvestada koostatud raport arvutisse [22].

5.1. Tulemused ekraanil

Nõutavate mõõtmete ekraanile kuvamiseks on vaja valida geomeetrilised elemendid, mille mõõtmeid on meil vaja teada. Väljundmõõtetulemuste eripära seisneb selles, et mõõtmeid saab kujutada samamoodi nagu joonisel. Geomeetriliste elementide valimisel määrab tarkvara automaatselt mõõtmete suuna, kui on soov saada diagonaalse suunaga, horisontaalse suunaga või nurga all mõõtmeid. Klõpsates arvutihiire parema nupuga saadud mõõtmetele, on võimalik valida mis tahes mõõtmete väljundfunktsioon.

Juhul kui mõõdetud geomeetrilised elemendid asetsevad üksteisele väga lähedal, on raske külge saada. Sel juhul saab kasutada nuppe geomeetriliste elementide valimiseks:



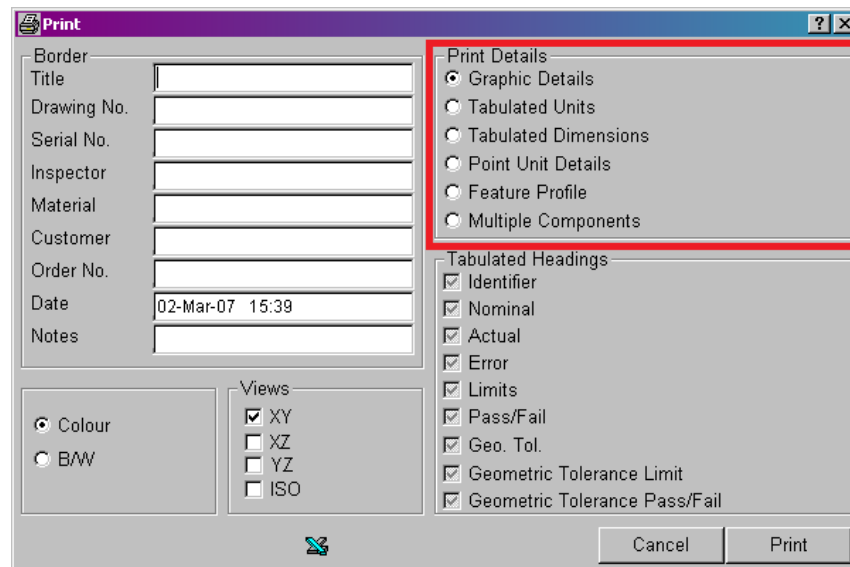
Joonis 5.1. Geomeetriliste elementide valimise nupud [22]

Number selles funktsioonis näitab mõõdetud geomeetriliste elementide järjekorda. Selle funktsiooni abil on valitud geomeetiline element põhiekraanil punast värvi kontuuriga esile toodud.

5.2. Raporti koostamine

Mõõtmistulemustega raporti koostamiseks tuleb salvestatud mõõtmised avada või juhul, kui detail on juba ära mõõdetud, valida printimisfunktsioon. Selle funktsiooni valimisel saame

lisada kogu vajaliku informatsiooni detaili kohta ja märgistada sobiliku printimisprotseduuri:



Joonis 5.2. Printimisfunktsiooniga aken Print [22]

Peamiseks printimisfunktsiooniks on võimalus valida kuue erineva printimise ja mõõteraporti kuvamise protseduuri vahel:

- **Graphic Details.** Kui on valitud graafilise kujutise protseduur, siis kuvatud mõõtmed on näidatud raportis samas vormis nagu põhiekraanil. Mõõtetööpinna valik on kohustuslik. On vaja valida mõõtetööpind, kus asuvad mõõdetavad geomeetrilised elemendid.
- **Tabulated Units.** Kuvatakse maksimaalne informatsiooni kogus tabelis valitud mõõtmetest.
- **Tabulated Dimensions.** Kõigi raportisse lisatud mõõtmete printimine.
- **Point Unit Details.** Sel juhul kuvatakse valitud geomeetrilise elemendi mõõtepunktid ja mõõtepunktide koordinaadid.
- **Feature Profile.** Sel juhul kuvatakse geomeetrilise elemendi kõikide punktide kujutis. Raport koosneb graafilisest kujutist ning näitab, kas mõõdetud elemendid vastavad geomeetrilise elemendi ideaalsele kujule.
- **Multiple Components.** Mitmete mõõdetud detailide mõõtmed kuvatakse ekraanile.

6. ÕPPEVAHENDI LOOMINE

Õppeprotsess jagatakse tavaliselt kaheks: teoreetiline ja praktiline osa. Teoreetiline osa õppeprotsessis on hoolikalt valitud ja analüüsitud informatsioon praktilise osa edukaks läbiviimiseks.

6.1. Teoreetiline osa

Käesoleva magistritöö teoreetiline osa oli koostatud nii, et koordinaat-mõõtemasinate uurimine oleks maksimaalselt arusaadav, loogiline ja sobiva mahuga. Selleks et aru saada, kuidas töötab koordinaat-mõõtemasin, oli põhjalikult kirjeldatud mõõtemasina konstruktsiooni põhielemente ning nende tööpõhimõtteid. Üksikasjalikult oli selgitatud koordinaat-mõõtemasina kalibreerimisprotsessi ning kirjeldatud informatsiooni võimalike mõõtmisvigade tekkimisest mõõtmise ajal.

Teoreetilise osa koostamiseks analüüsiti 24 allikat, sealhulgas internetfoorumeid, mis on keskendunud koordinaat-mõõtemasinate programmeerimisele ning koordinaatsüsteemide konstrueerimisele. Analüüsitud allikad on toodud peatükis „Kasutatud kirjandus“.

Koordinaat-mõõtemasina Axiom Too uurimise käigus tuli ilmsiks erinevaid probleeme, mis vajasid lisainformatsiooni ning selgitusi. Magistritöö teoreetiline osa sobib enamiku programmeerimisfunktsiooniga või programmeerimisfunktsioonita silla-tüüpi koordinaat-mõõtemasinate õpetamiseks. Teoreetilise osa peamised ülesanded määrati kindlaks õppeprotsessi ja töötajate koolitamise ajal tootmisettevõttes Hanza Mechanics Tartu. Teoreetilise osa loomisel pöörati erilist tähelepanu tagasisidele, mille töötajad pärast õppimist ning koolitust jätsid. Analüüsitud informatsiooni põhjal koostati õppematerjali teoreetilise osa peamiste ülesannete loetelu:

1. Kirjeldada koordinaat-mõõtemasina tööpõhimõtteid.
2. Esitada vajalik informatsioon koordinaat-mõõtemasina konstruktsiooni omaduste ning põhielementide kohta.
3. Käsitleda kasulikku informatsiooni mõõtemasina koordinaatsüsteemist.
4. Kirjeldada koordinaat-mõõtemasina mõõtepeade tööprotsessi, pöörates erilist tähelepanu TP20 mõõtepeale, mida kasutatakse koordinaat-mõõtemasinas Axiom Too.

5. Kirjeldada põhjalikult mõõtemasina kalibreerimisprotsessi ning mõõteotsiku kvalifitseerimisprotsessi.
6. Esitada vajalik informatsioon mõõteotsikutest ning nende kasutamise võimalustest.

6.2. Praktiline osa

Praktiliseks osaks valiti kõige keerukamad mõõteotsikud: keraamiline kettakujuline mõõteotsik, kettakujuline mõõteotsik rullikuga ning viiesuunaline mõõteotsik *Star*. Mõõteotsikud valiti soone läbimõõdu ja soone laiuse mõõtmise ülesande lahendamiseks. Samuti kirjeldatakse mõõtmiste jätkamise võimalusi antud mõõteotsikutega. Analüüsitud informatsiooni ning koolitatud töötajate tagasiside põhjal koostati praktilise osa ülesannete loetelu:

1. Käsitleda informatsiooni mõõdetava objekti koordinaatsüsteemi konstrueerimisest.
2. Selgitada näidete abil detaili mõõtmisstrateegiat.
3. Kirjeldada keerukamate mõõteotsikute (keraamiline kettakujuline mõõteotsik, kettakujuline mõõteotsik rullikuga ning mõõteotsik *Star*) kvalifitseerimisprotsessi.
4. Selgitada geomeetriliste tolerantside kohta informatsiooni saamist.

Praktilise osa jaoks loodi kirjalik õppetöö juhend, mis on toodud magistritöö peatükis „Lisad“, ning ingliskeelsed õppevideod. Õppetöö juhend ja õppevideod on sama seerianumbri ja nimetusega. Õppetöö juhend koosneb kaheksast osast:

1. Mõõtmissondi puhastus. Selles jaotises kirjeldatakse, kuidas sondimõõtesüsteemi õigesti puhastada, antakse nõu puhastusvahendite kohta. Õppevideo vaatamiseks tuleb avada videofail “1. Cleaning the probe system”.
2. Keraamilise kettakujulise mõõteotsiku kvalifitseerimine. Antakse üksikasjalikud juhised kvalifikatsiooni kohta. Õppevideo vaatamiseks tuleb avada videofail “2. Ceramic disc stylus qualification”.
3. Mõõtmine keraamilise kettakujulise ilma rullikuta mõõteotsikuga. Antakse põhjalikud juhised mõõdetava objekti koordinaatsüsteemi konstrueerimise ning mõõtmise kohta keraamilise kettakujulise mõõteotsiku abil. Näidatakse, kuidas selle mõõteotsikuga mõõta soone läbimõõtu. Õppevideo vaatamiseks tuleb avada videofail “3. Measuring with a ceramic disc stylus (without roller)”.

4. Kettakujulise mõõteotsiku rullikuga kvalifitseerimine. Antakse üksikasjalikud juhised kvalifikatsiooni kohta kalibreerimissfääri abil. Õppevideo vaatamiseks tuleb avada videofail “4. Disc stylus with roller qualification”.
5. Mõõtmise kettakujulise rullikuga mõõteotsikuga. Antakse põhjalikud juhised mõõdetava objekti koordinaatsüsteemi konstrueerimise ning mõõtmise kohta kettakujulise rullikuga mõõteotsiku abil. Näidatakse, kuidas selle mõõteotsikuga mõõta soone läbimõõtu ning soone laiust. Õppevideo vaatamiseks tuleb avada videofail “5. Measuring with a disc stylus with roller”.
6. *Star* mõõteotsikute kvalifitseerimine. Antakse üksikasjalikud juhised kvalifikatsiooni kohta kalibreerimissfääri abil. Õppevideo vaatamiseks tuleb avada videofail “6. Star stylus qualification”.
7. Mõõtmise *Star* mõõteotsikuga. Antakse põhjalikud juhised mõõdetava objekti koordinaatsüsteemi konstrueerimise ning mõõtmise kohta *Star* mõõteotsiku abil. Näidatakse, kuidas selle mõõteotsikuga mõõta soone läbimõõtu ning soone laiust. Õppevideo vaatamiseks tuleb avada videofail “7. Measuring with a Star stylus”.
8. Informatsioon lisaelementidest mõõtmise jaoks. Selles peatükis käsitletakse informatsiooni kalibreerimissfäärist, mõõteotsikute mõõtmetest ning pikendustest.

6.3. Videomaterjalid

Spetsiaalselt sellele magistritöö jaoks loodi 7 õppevideot. Õppevideo juhendite kogupikkus on 26 minutit ja 37 sekundit. Igas õppevideos on üksikasjalikud kommentaarid ekraanil toimuva kohta. Õppevideotes näidatakse Aberlinki 3D-tarkvara funktsiooni kasutamist, detaili mõõtmisprotsessi või nende kahe protsessi kombinatsiooni. Õppevideotes on põhjalikud selgitused ning esile toodud olulised toimingud tarkvaraga.

Õppematerjalid asuvad GoogleDrive virtuaalses kõvakettas: <https://drive.google.com/drive/folders/1uMwPWHP3ObckeFuguoDJQKfPSkVRaPr?usp=s> haring

KOKKUVÕTE

Käesolevas magistritöös lahendati peamise eesmärgi saavutamiseks püstitatud ülesanded. Parima tulemuse saavutamiseks filmiti ning monteeriti õppevideo materjalid. Kokkuvõttes on magistritöö sisu järgnev:

1. Lõputöö teoreetilises osas tutvustati koordinaat-mõõtemasina erinevaid tüüpe ning mõõtemasina tööpõhimõtteid.
2. Põhjalikult esitati ja selgitati ISO 10360 standardit. Anti soovitusi koordinaat-mõõtemasina mõõtevea vähendamise võimaluste kohta. Käsitleti valemit temperatuurivea arvutamiseks kalibreerimismaterjalide jaoks.
3. Lõputöö kirjutamise käigus selgitati kalibreerimise, kontrollimise ning kvalifitseerimise mõisteid.
4. Erilist tähelepanu pöörati magistritöö uurimisobjekti, Axiom Too koordinaat-mõõtemasina kalibreerimisprotsessile. Uuriti standardit ASME B89.4.1b-2001, mille järgi kalibreeritakse koordinaat-mõõtemasinat Axiom Too.
5. Koordinaat-mõõtemasina Axiom Too tööpõhimõtte mõistmiseks käsitleti magistritöös informatsiooni peamiste põhikonstruktsioonelementide kohta. Mõõtemasina peamiste liikuvate elementide uurimiseks analüüsiti koordinaat-mõõtemasinate Mitutoyo BHN305 ning Johansson Cordimet 800 konstruktsioone.
6. Lõputöös on põhjalikult käsitletud informatsiooni koordinaat-mõõtemasina Axiom Too mõõtesüsteemi tööst, erilist tähelepanu pöörati puutetundlikule mõõtepeasondile TP20.
7. Õppevahendisse on lisatud informatsioon Axiom Too mõõtepea pööramise omaduste ja võimaluste kohta.
8. Õppevahendi jaoks vajalikuks informatsiooniks on ka peatükk mõõteotsikutest. Õppevahendis esitati soovitused õige mõõteotsiku ja mõõtmismetoodikate valimise kohta.
9. Õppevahendis sai lahendatud oluline probleem: mõõteotsiku korrektse kvalifitseerimisprotsessi teostamine.
10. Õppevahendis on käsitletud informatsiooni mõõtmisstrateegiate kohta. Iga geomeetrilise elemendi jaoks on esitatud informatsioon mõõdetavate mõõtepunktide arvust, vektorite suundadest ning õige töötasapinna valimisest mõõtmisprotsessis.
11. Lõputöö kirjutamise käigus oli keeruliseks ülesandeks selgitada mõõdetava objekti koordinaatsüsteemi konstrueerimisprotsessi. Selle probleemi lahendamiseks filmiti ning

- monteeriti õppevideod ning näidiste jaoks valiti kõige keerukamad mõõteotsikud. Käsitleti mitut variantit mõõdetud objekti koordinaatsüsteemi baseerimiseks.
12. Õppevahendis selgitati Axiom Too mõõtemasina tarkvara keerukamaid funktsioone. Aberlinki 3D-tarkvara uurimise käigus tõsteti esile keerukaid funktsioone, näiteks geomeetriliste elementide konstrueerimine, mõõtetulemuste välja võtmine, salvestamise võimalus ning geomeetriliste tolerantside mõõtmise võimalus.
 13. Loodi kirjalik praktiline juhend, mille järgi saab keerulisi mõõteotsikuid õigesti kvalifitseerida: keraamiline kettakujuline mõõteotsik, kettakujuline mõõteotsik rullikuga ning viiesuunaline mõõteotsik *Star*.
 14. Praktiline juhend sisaldab lisainformatsiooni keeruliste mõõteotsikute kvalifitseerimise ning sisesoone mõõtmise kohta.
 15. Praktilises juhendis anti üksikasjalik ülevaade sisesoone läbimõõdu ning laiuse mõõtmise kõigi võimalike viiside kohta.
 16. Praktilise juhendi põhjal filmiti ning monteeriti õppevideo juhendimaterjalid. Õppevideo materjalid on esitatud koos kommentaaridega iga toimingu kohta.
 17. Õppevideo materjalides on näidatud erinevate geomeetriliste elementide mõõtmine, geomeetriliste elementide konstrueerimise võimalused ning koordinaatsüsteemi loomise võimalused uuritavate mõõteotsikute jaoks.
 18. Õppevahend on loodud nii, et see oleks maksimaalselt arusaadav, loogiline ning sobiva mahuga.
 19. Loodud õppevahend sobib suurepäraselt koordinaat-mõõtemasinaga Axiom Too mõõtmiste tegemise õpetamiseks.
 20. Õppevahendi teoreetiline osa sobib põhiteadmiste õpetamiseks iga silla-tüüpi koordinaat-mõõtemasinate jaoks.

KASUTATUD KIRJANDUS

1. **Бражкин, Б.С., Миротворский, В.С.** (2010) Координатно-измерительные машины для контроля тел вращения. Учебный материал. Москва. 208 с.
2. **Васильев, А.С.** (1988) Основы метрологии и технические измерения. Учебное пособие. Москва. 237 с.
3. **Гапшис, В.-А. А., Каспарайтис, А.Ю., Модестов, М.Б., Рамайаускас, В.-З.А., Серков, Н.А., Чудов, В.А.** (1988) Координатные измерительные машины и их применение. Москва. 328 с.
4. **Michael Mino.** (2012) CMM: beginners understanding. 22 p.
5. **Nobuo Suga.** (2007) Metrology Handbook: the science of measurement. London. 259 p.
6. **Robert J. Hocken, Paulo H. Pereira.** (2012) Coordinate Measuring Machines and Systems. Second Edition. University of North Carolina. 574 p.
7. **Mark Boucher.** (2009) The CMM Handbook V6. 200 p.
8. **Зубарев, Ю.М., Косаревский, С.В., Ревин, Н.Н.,** (2011) Автоматизация координатных измерений. Учебное пособие. Санкт-Петербург. 153 с.
9. **David Flack.** (2014) CMM Measurement strategies. National Physical Laboratory. Teddington. 108 p.
10. **David Flack.** (2011) CMM Verification. National Physical Laboratory. Teddington. 101 p.
11. **David Flack.** (2014) CMM Probing. National Physical Laboratory. Teddington. 92 p.
12. **David Flack.** (2013) Co-ordinate measuring machine task-specific measurement uncertainties. National Physical Laboratory. Teddington. 72 p.
13. **Aberlink Innovate Metrology** (2021). [veebileht]
<https://www.aberlink.com/products/coordinate-measuring-machines/axiom-too/cnc/>
(03.02.2021).
14. **Renishaw. CMM accessories** (2021). [veebileht]
<https://www.renishaw.com/Shop/Default/Home/CMMAccessories> (16.02.2021).
15. **Hexagon Metrology** (2021). [veebileht]
<https://www.hexagonmi.com/products/coordinate-measuring-machines/cmm-sensors>
(26.02.2021).
16. **Mitutoyo** (2021). [veebileht]
<https://shop.mitutoyo.eu/web/mitutoyo/en/mitutoyo/08/Coordinate%20Measuring%20Machines/index.xhtml> (03.03.2021).

17. **Rein Laaneots, Karl Raba.** (2017) Mõõtmestamine ja tolereerimine. Haridus- ja Teadusministeerium. Tallinn. 430 lk.
18. **Ulrich Fischer, Roland Gomeringer, Max Heinzler, Roland Kilgus, Friedrich Näher, Stefan Oesterle, Heinz Paetzold, Andreas Stephan.** (2012) Mechanical and Metal Trades Handbook/Mehaanikainseneri käsiraamat. Haan-Gruiten. 492 lk.
19. **Ralf Christoph, Hans J Neumann.** (2003) Multisensor-Koordinatenmesstechnik: Produktionsnahe optisch-taktile Mass-, Form- und Lagebestimmung. 96 s.
20. **Тимирязев, В.А., Схиртладзе, А.Г., Радкевич, Я.М., Дмитриев, С.И., Ершова, И.Г., Белов, В.С.** (2016) Метрологическое обеспечение и автоматизация измерений и контроля в машиностроении. Псков. 200 с.
21. **Connie L. Dotson.** (2014) Fundamentals of Dimensional Metrology. Boston. 626 p.
22. Aberlink 3D Measuring Software (2009). Manchester. 344 p.
23. Geometrical product specification. ISO 10360-5 (2020). [veebileht] <https://www.evs.ee/et/iso-10360-5-2020> (21.04.2021).
24. ASME B89.4.1b – 2001 American National Standard (2002). [veebileht] <https://www.scribd.com/document/439322714/ASME-B89-4-1b-2001-ADDENDA> (08.05.2021).

LEARNING MATERIALS FOR THE COORDINATE MEASURING MACHINE

Summary

The aim of this Master's thesis creates learning materials for the coordinate measuring machine, all tasks to achieve the aim have been completed. To obtain a better learning results, were filmed and edited training video materials. Tasks that were completed in the process of writing a Master's work:

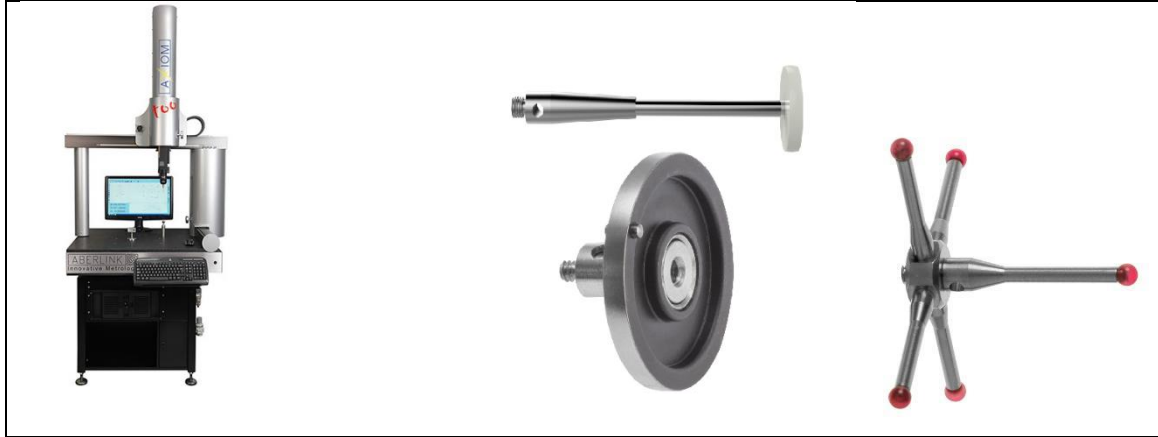
6. In the theoretical part of the Master's thesis the different types of coordinate measuring machines and the principles of measuring machine operation were introduced.
7. The ISO10360 standard is presented and explained in detail. Recommendations are given on the possibilities of reducing the error of the measuring machine. The formula for calculating the temperature error for calibration standards made of steel is given.
8. In the process of writing the Master's work, correctly explained the concepts of calibration, control and qualification.
9. Particular attention was paid to the calibration, an object of study – the measuring machine Axiom Too. The ASME B89.4.1B-2001 standard was investigated, according to which the Axiom Too coordinate measuring machine is calibrated.
10. To understand the principle of operation of the Axiom Too coordinate measuring machine, in the Master's work provides information on the main structural elements of the measuring machine. To study the main moving elements of the measuring machine, the designs of the measuring machines Mitutoyo BHN305 and Johansson Cordimet 800 were analyzed.
11. In the Master's work is described in detail the work of the Axiom Too measuring system, particular the trigger measuring probe TP20.
12. The training manual has added information about the possibilities and features of rotating the measuring head.
13. The necessary information for the training manual is the characteristic of the measuring styluses. Recommendations of choosing the correct stylus and the correct measurement strategy.
14. Solved an important task – the correct qualification of the measuring styluses.

15. The learning materials provides information about the measurement strategy. For each geometric element, instructions are given on the number of points to be measured, on the directions of the vectors, on the choice of the correct working surface for measurement.
16. In the process of writing the Master's work of a difficult problem, it turned out to explain the process of constructing the coordinate system for the measuring object. For this problem have been selected complex styluses. Several options for basing the coordinate system of the measured object are considered.
17. Explained the complex functions of the Axiom Too measuring machine software.
18. Has been created training manual for qualifying and measuring with complex styluses: a ceramic disc stylus, disc stylus with roller and Star measuring stylus.
19. The training manual consists of additional information on the qualification of complex styluses and the measurement of grooves.
20. Detailed instructions are given for measuring the diameter and width of the grooves in all possible methods.
21. Based on the training manual, filmed and edited video tutorials. Video tutorials are presented with commentary for each action.
22. In the video tutorials show the measurement functions of various geometric elements, constructing geometric elements and creating a coordinate system for each of the study styluses.
23. The learning material is compiled as clearly possible, logical and with the desired amount of information.
24. The created learning material is perfect for teaching measurements on the coordinate measuring machine Axiom Too.
25. The theoretical part of learning materials, suitable for teaching basic knowledge for any bridge coordinate measuring machine with Decart coordinate system.

LISAD

Lisa A. Axiom Too. Mõõteotsiku kvalifitseerimine, koordinaatsüsteemi loomine

Figure of an example



Short introduction presenting a considered example and its application

In this example we will have a look on how to properly prepare the measuring probe for measurement. By the end, it will be completely explained how to measure the detail with disc styluses. Including how to create alignments and construct the coordinate system of a detail, using a disk stylus without roller and a disk stylus with roller. What are the additional measurement options and styluses.

With this project, we will take a closer look at how to properly qualify the measuring styluses. What data should be used to configure the stylus. For qualification, the following will be used: disc stylus with roller and extension, ceramic disc stylus without roller and Star stylus. All measurements and qualification of the styluses will be carried out on the manual coordinate measuring machine Axiom Too.

A Table of Contents

	Pages
1. Cleaning the probe system	
2. Ceramic disc stylus without roller qualification	
3. Aligning the axes of a component and groove measuring with disc stylus (without roller)	
4. Disc stylus with roller qualification	
5. Aligning the axes of a component and groove measuring with disc stylus (with roller)	
6. Star stylus qualification	
7. Aligning the axes of a component and groove measuring with Star stylus	
8. Information about components for measurement	

Name of a stage: 1. Cleaning the probe system

The probe system: one of the basic concepts for a coordinate measuring machine. The measuring probe system consists of: probe body with magnetically help kinematic coupling for a changing probe module, changing module for the touch-trigger probe system and a stylus for measurement.

Most important conditions for cleaning the probe system

We should only use special cleaning products for example - cleaning material for stylus and module changing probe from „ Renishaw “.

Here we are only considering one of the options for cleaning the probe system. Shown is an example of installing the changing probe module to the probe body. The key points below are listed in the correct order.

Cleaning material for stylus and module changing probe from „ Renishaw “.

The kinematic coupling mechanisms of stylus and module changing probe systems have an electrical contacts and permanent magnets on which dust and other particles can accumulate, affecting performance.

These features should be visually inspected and cleaned, if necessary, with the specialised material. For information on how often the probe system needs to be cleaned, refer to the instructions for the coordinate measuring machine.

How to clean the probe system

We should only use special cleaning products for example - cleaning material for stylus and module changing probe from „ Renishaw “.

Press the material firmly into the kinematic coupling faces. To ensure effective cleaning, do not reuse any area of the material.

Before cleaning the probe system

The changing module is dirt and metal particles on the magnetic part:

After cleaning the probe system

Changing module magnetic part is completely cleaned.

Installation changing module to the probe system

When installing, must be combined the same geometric shapes:

This is an important step after which we will install the measuring stylus into the changing module in the probe system. The measuring part of the probe must not be touched by hands, it must be cleaned in the same way as the changing module.

There is a video instruction specially for this stage: 1. Cleaning the probe system

Name of a stage: 2. Ceramic disc stylus qualification

Stylus qualification: When using the Aberlink 3D software to inspect a component, the software must know the relative position and diameter of the stylus ball being used.

Most important conditions for qualification

This is achieved by using the probe stylus disc to measure the reference ball, which is mounted on the granite table. As the size and position of the reference ball are known, this measurement is used to determine the size and relative position of the stylus disc. This information is stored as three position offsets X,Y and Z, and a diameter.

Obtaining this information is known as datuming the probe. The probe must be datumed every time you change a stylus, or if you have an indexable probe, each time you move the probe head to a position that has not previously been datumed.

Technical data we need to know

To properly datuming/qualify the ceramical disc stylus, we need to know the technical parameters of the stylus: the length of the stylus and the diameter of the stylus disc.

If we use MH20i probe system type we have to stick of the rule: stylus length plus probe module – from center of ruby ball to probe module magnetic joint (use for the stylus length plus 20mm)

Number of measured points

The minimum number of measuring points on the calibration sphere is 5 measuring points. Take five points around the outside diameter of the calibration sphere varying the height to cover the spherical form along the edge of the disc.

We have the option to save the probe configuration after qualification. It is important that each time the probe is changed, it must be re-qualified.

There is a video instruction specially for this stage: 2. Ceramic disc stylus qualification

Problems for self-assessment

1. Can a straight probe be qualified in the same way?
2. Can we use a different calibration sphere?

Name of a stage: 3. Aligning the axes of a component and groove measuring with disc stylus (without roller)

Stylus without roller: When we use a disc stylus without roller, we cannot accurately measure the width of the groove or measure any surface if it is located at the top or bottom of the measuring stylus.

Most important conditions for aligning

With a ceramic disc stylus without roller, we can't measure the plane on the Z axis. If the plane has not been defined, a warning window will be displayed telling you 'The plane this feature is in can't be determined if you click 'OK' the machine XY, XZ or YZ plane will be used as the projected plane.

Advice for measuring	To correctly measure the groove diameter, we must use disc styluses. If the groove diameter is located deeper than the length of the qualified disc stylus, we can use a stylus extension. Extension cords come in different lengths 5, 10, 20, 40, 60, 100 mm. In this case, we will need to do the procedure for qualifying the disc stylus not now with extension. Touching should only be done with the disc tip of the stylus.
Aligning the axes	Since we cannot measure planes, lines or points along the Z axis, we have the ability to determine only 4 degrees of freedom out of 6. This can affect the measurement result.
We have the ability to save information about measured geometric objects. There is a video instruction specially for this stage: 3. Measuring with a ceramic disc stylus (without roller)	
Problems for self-assessment <ol style="list-style-type: none"> 1. What geometric shapes can we measure with a ceramic disc stylus without roller? 2. Can we rotate the measuring head and measure the side holes with a ceramic disc stylus without roller? 	

Name of a stage: 4. Disc stylus with roller qualification	
Stylus qualification: When using the Aberlink 3D software to inspect a component, the software must know the relative position and diameter of the stylus ball being used.	
Most important conditions for qualification	
<p>This is achieved by using the probe stylus ball to measure the reference ball, which is mounted on the granite table. As the size and position of the reference ball are known, this measurement is used to determine the size and relative position of the stylus ball. This information is stored as three position offsets X, Y and Z, and a diameter.</p> <p>Obtaining this information is known as datuming the probe. The probe must be datumed every time you change a stylus, or if you have an indexable probe, each time you move the probe head to a position that has not previously been datumed.</p>	
Technical data we need to know	<p>To properly datuming/qualify the disc stylus with roller, we need to know the technical parameters of the stylus: the length of the stylus, the diameter of the stylus disc and the length of the roller.</p> <p>If we use MH20i probe system type we have to stick to the rule: stylus length plus probe module – from center of ruby ball to probe module magnetic joint (use for the stylus length plus 20mm)</p>

Length of the roller	Measure the length of the stud using a micrometer or vernier and note. The length will also be its diameter in the second offset.
Number of measured points	The minimum number of measuring points on the calibration sphere is 5 measuring points. For first offset of the stylus system: take five points around the outside diameter of the calibration sphere varying the height to cover the spherical form along the edge of the disc. For second offset of the stylus system: take about 10 points using the spherical form on the bottom of the stud (only a small area on top of the ball is accessible). This will give a position of the sphere's center relative to the bottom of the Z quill. Edit the ball diameter on offset 2 so it is matching the length previously measured. Also, you need edit the diameter of offset 1 to match the actual disc diameter.
Roller rotation	We can position the roller of disc stylus as needed, but then we need to choose the correct position of the roller on the stylus system.
We have the option to save the probe configuration after qualification. It is important that each time the probe is changed, it must be re-qualified. There is a video instruction specially for this stage: 4. Disc stylus with roller qualification	
Problems for self-assessment <ol style="list-style-type: none"> 1. Can „Star“ probe be qualified in the same way? 2. Can we use the extensions for disc stylus? 3. When and how often we must qualify the stylus? 	

Name of a stage: 5. Aligning the axes of a component and groove measuring with disc stylus (with roller)	
Stylus witht roller: When we use a disc stylus with roller, we can accurately measure the width of the groove or measure any surface if it is located at the top or bottom of the measuring stylus.	
Most important conditions for aligning	
With a disc stylus with roller, we can measure the plane on the Z axis. We can define all 6 degrees of freedom for a detail and get the most accurate measurements.	
Advice for measuring	To correctly measure the groove diameter, we must use disc styluses. If the groove diameter is located deeper than the length of the qualified disc stylus, we can use a stylus extension. Extension cords come in different lengths 5, 10, 20, 40, 60, 100 mm. In this case, we will need to do the procedure for qualifying the disc stylus nut now with extension. Touching should only be done with the disc tip of the stylus.

Aligning the axes	With the help of a roller, we can measure the plane to immediately determine the 3 degrees of freedom for the part to be measured. Measure the line along the X axis and determine 2 more degrees of freedom, measure the line along the Y axis and determine the last degree of freedom. We constructed the full coordinate system of the measured detail.
We have the ability to save information about measured geometric objects. There is a video instruction specially for this stage: 5. Measuring with a disc stylus (with roller)	
Problems for self-assessment <ol style="list-style-type: none"> 1. What geometric shapes can we measure with a disc stylus with roller? 2. Can we rotate the measuring head and measure the side holes with a disc stylus with roller? 3. Can we measure the position of groove? 	

Name of a stage: 6. Star stylus qualification	
Stylus qualification: When using the Aberlink 3D software to inspect a component, the software must know the relative position and diameter of the stylus ball being used. Star stylus have 5 different probes.	
Most important conditions for qualification	
This is achieved by using the probe stylus ball to measure the reference ball, which is mounted on the granite table. As the size and position of the reference ball are known, this measurement is used to determine the size and relative position of the stylus ball. This information is stored as three position offsets X,Y and Z, and a diameter. Obtaining this information is known as datuming the probe. The probe must be datumed every time you change a stylus, or if you have an indexable probe, each time you move the probe head to a position that has not previously been datumed.	
Technical data we need to know	To properly datuming/qualify the Star stylus, we need to know the technical parameters of the stylus: the length of the stylus, the diameter of the stylus disc and the length of the roller. If we use MH20i probe system type we have to stick of the rule: stylus length plus probe module – from center of ruby ball to probe module magnetic joint (use for the stylus length plus 20mm)
Star stylus configuration	Star stylus have 5 different probes and extensions.
Number of measured points	The minimum number of measuring points on the calibration sphere is 5 measuring points. For second, third, fourth and fifth offset of the stylus system: take about 5 points using the spherical form. After each probe qualification, information about it will appear in the table.

Star stylus rotation	We can position the Star stylus as needed. With the Star stylus, we can rotate the measuring head, but before starting the measurement, all the positions of the stylus must be qualified.
We have the option to save the probe configuration after qualification. It is important that each time the probe is changed, it must be re-qualified. There is a video instruction specially for this stage: 6. Star stylus qualification	
Problems for self-assessment <ol style="list-style-type: none"> 1. Can „Star “probe qualification be saved? 2. Can we use the extensions for Star stylus? 3. When and how often we must qualify the stylus? 4. What is the maximum length 2, 3, 4, 5 styluses can be? 5. Is it possible to construct the coordinate system of a detail 2, 3, 4 or 5 with the stylus position? 	

Name of a stage: 7. Aligning the axes of a component and groove measuring with Star stylus	
Star stylus: When we use a Star stylus, we can accurately measure the width of the groove or measure any surface if it is located at the top or bottom of the measuring stylus. For technical documentation you need to go to the link: https://www.renishaw.com/shop/Product.aspx?Product=A-5000-3626	
Most important conditions for aligning	
With a Star stylus, we can measure the plane on the Z axis. We can define all 6 degrees of freedom for a detail and get the most accurate measurements.	
Advice for measuring	<p>To correctly measure the groove diameter, we have option – Star stylus. If the groove diameter is located deeper than the length of the qualified disc stylus, we can use a stylus extension. Extension cords come in different lengths 5, 10, 20, 40, 60, 100 mm, but only for 1 stylus position. In this case, we will need to do the procedure for qualifying the Star stylus with extension.</p> <p>To measure the groove diameter with the Star stylus, we need to select the correct stylus position and measure the point. We can measure multiple points. Positions 2, 3, 4, 5 will allow us to measure the required number of points, after which we can construct a circle.</p>
Aligning the axes	With Star stylus, we can measure the plane to immediately determine the 3 degrees of freedom for the part to be measured. Measure the line along the X axis and determine 2 more degrees of freedom, measure the line along the Y axis and determine the last degree of freedom. We constructed the full coordinate system of the measured detail.
We have the ability to save information about measured geometric objects. There is a video instruction specially for this stage: 7. Measuring with a Star stylus	
Problems for self-assessment	

1. What geometric shapes can we measure with a Star stylus?
2. Can we rotate the measuring head and measure with Star stylus?
3. Can we measure the position of groove?

Name of a stage: 8. Information about components for measurement	
Coordinat measuring maschine : Axiom too manual CMM	
Measurment software : Aberlink 3D	
This stage provides the necessary information about the components for a successful measurement.	
Calibration sphere	A calibration sphere is required to qualify all styluses. The sphere data is integrated into the software, if the sphere is replaced or changed, the data must be modified.
Disc stylus without roller	There are drawings for all stylus, in the drawing we will be able to find out the exact dimensions of the stylus, which we need for qualification. Disc stylus length is 32 mm, disc diameter is 8 mm. there is a drawing: https://www.renishaw.com/shop/Product.aspx?Product=A-5555-0297
Disc stylus with roller	There are drawings for all stylus, in the drawing we will be able to find out the exact dimensions of the stylus, which we need for qualification. Disc stylus length is 8.2 mm, disc diameter is 18 mm, roller diameter in second offset is 2.5 mm. there is a drawing: https://www.renishaw.com/shop/Product.aspx?Product=A-5004-1387
Extension	There are different lengths for stylus extensions, you can find out the length on the drawings or measure the length with a caliper. Extension length 40 mm.
Watch all the videos to get the measuring process right. The qualification of the straight stylus is based on the principle to the qualification of stylus disc without a roller. The qualification of the 5-axis stylus “Star” is based on the principle to the qualification of stylus disc with roller.	

**Lihtlitsents lõputöö salvestamiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks ning
juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta**

Mina, Eduard Herm,

sünniaeg (21/08/1992),

1. annan Eesti Maaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda koostatud lõputöö „Õppevahend koordinaat-mõõtemasina (CMM) kasutamiseks“,

mille juhendaja(d) on Tõnu Leemet (*PhD*),

- 1.1. salvestamiseks säilitamise eesmärgil,
- 1.2. digiarhiivi DSpace lisamiseks ja
- 1.3. veebikeskkonnas üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile;

3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Lõputöö autor allkirjastatud digitaalselt

Tartu, 01.06.2021

Juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta

Luban lõputöö kaitsmisele.

Tõnu Leemet allkirjastatud digitaalselt

01.06.2021